

ПЛАМЕН ЦАНКОВ МИЛКО ЙОВЧЕВ

ОСВЕТИТЕЛНА И ИНСТАЛАЦИОННА ТЕХНИКА



УНИВЕРСИТЕТСКО ИЗДАТЕЛСТВО
ГАБРОВО
2024

ПЛАМЕН ЦАНКОВ

МИЛКО ЙОВЧЕВ

ОСВЕТИТЕЛНА И ИНСТАЛАЦИОННА ТЕХНИКА



УНИВЕРСИТЕТСКО ИЗДАТЕЛСТВО
“ВАСИЛ АПРИЛОВ”
ГАБРОВО, 2024

Учебникът по Осветителна и инсталационна техника представя лекционен материал по учебната дисциплина „Осветителна и инсталационна техника“ за студенти от специалности „Електроенергетика и електрообзавеждане“, „Електроснабдяване и електрообзавеждане“ и „Възобновяеми енергийни източници и енергийна ефективност“ при Технически университет – Габрово, както и за студенти, изучаващи тази дисциплина в други висши училища в България. Съдържанието може да бъде полезно и за инженери, проектанți и изследователи в областта на осветлението.

Целта на учебника е запознаване на студентите с основните въпроси, свързани с физичните свойства на светлината, основните зрителни характеристики, оптичните свойства на телата, светлинните величини и техните зависимости, цвета и цветовите характеристики, светлотехническите измервания, устройството, параметрите и характеристиките на светлинни източници и осветители, пускорегулиращата апаратура и управлението на осветлението, качествените показатели на осветлението. Въпросите, свързани с проектиране на улични и тунелни осветителни уредби, прожекторно осветление, осветление на спортни обекти, художествено и фасадно осветление, се изучават в учебната дисциплина „Проектиране на осветителни уредби“. Въпросите, свързани с проектиране на вътрешни осветителни уредби и електрически инсталации на осветителни уредби, се разглеждат в Ръководството за курсова работа по Осветителна и инсталационна техника.

Съдържанието на учебника е съставено на базата на актуални литературни източници: основни учебници и учебни пособия по дисциплината в университетите в България, национални и международни нормативни документи, техническа и справочна литература и ръководства по осветителни уредби на водещи фирми в областта на електрическото осветление.

© Пламен Ценков Цанков – автор, 2024

© Милко Тодоров Йовчев – автор, 2024

Рецензент: доц. д-р инж. Стойо Колев Платиканов

Печат: Университетско издателство “Васил Априлов” – Габрово, 2024
ISBN: 978-954-683-701-1

С Ъ Д Ъ Р Ж А Н И Е

ИЗПОЛЗВАНИ СЪКРАЩЕНИЯ	4
1. ФИЗИЧНИ ОСНОВИ НА СВЕТЛИНАТА. ИЗЛЪЧВАНЕ И ЛЪЧИСТ ПОТОК. ПРИЕМНИЦИ НА ЛЪЧИСТА ЕНЕРГИЯ	5
2. ОСНОВНИ ЗРИТЕЛНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ. СПЕКТРАЛНА ЕФЕКТИВНОСТ НА ЧОВЕШКОТО ЗРЕНИЕ	13
3. СВЕТЛИНЕН ПОТОК. ИНТЕНЗИТЕТ НА СВЕТЛИНАТА. СВЕТЛОРАЗПРЕДЕЛИТЕЛНА КРИВА	20
4. ОСВЕТЕНОСТ. КОСИНУСОВ ЗАКОН И ЗАКОН ЗА КВАДРАТИЧНОТО ОТДАЛЕЧЕНИЕ. ЯРКОСТ	33
5. ХОРИЗОНТАЛНА, ВЕРТИКАЛНА, ПРОСТРАНСТВЕНА, СРЕДНА СФЕРИЧНА, СРЕДНА ПОЛУСФЕРИЧНА, СРЕДНА ЦИЛИНДРИЧНА И СРЕДНА ПОЛУЦИЛИНДРИЧНА ОСВЕТЕНОСТ	42
6. ОПТИЧНИ СВОЙСТВА НА ТЕЛАТА. ОТРАЖЕНИЕ, ПРОПУСКАНЕ, ПОГЛЪЩАНЕ И ПРЕЧУПВАНЕ НА СВЕТЛИНАТА.....	54
7. ЦВЯТ. ЦВЕТОВИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА СВЕТЛИННИТЕ ИЗТОЧНИЦИ. 69	
8. ОСНОВНИ ЗАКОНИ НА ТОПЛИННОТО ИЗЛЪЧВАНЕ. ЕФЕКТИВНОСТ НА ТОПЛИННОТО ИЗЛЪЧВАНЕ. ЛУМИНЕСЦЕНТНО ИЗЛЪЧВАНЕ	90
9. НАЖЕЖАЕМА ЛАМПА. НАЖЕЖАЕМА ХАЛОГЕННА ЛАМПА.....	103
10. ЛУМИНЕСЦЕНТНА ЛАМПА. КОМПАКТНА ЛУМИНЕСЦЕНТНА ЛАМПА. ИНДУКЦИОННА ЛАМПА	113
11. ЖИВАЧНА ЛАМПА С ВИСОКО НАЛЯГАНЕ	125
12. НАТРИЕВА ЛАМПА С ВИСОКО НАЛЯГАНЕ. НАТРИЕВА ЛАМПА С НИСКО НАЛЯГАНЕ.....	129
13. МЕТАЛХАЛОГЕННА ЛАМПА С ВИСОКО НАЛЯГАНЕ	135
14. КСЕНОНОВА ЛАМПА.....	139
15. СВЕТОДИОД (LED). СРАВНЕНИЕ НА ОСНОВНИТЕ ПАРАМЕТРИ НА СВЕТЛИННИТЕ ИЗТОЧНИЦИ.....	143
16. ПУСКОВО-РЕГУЛИРАЩА АПАРАТУРА. УПРАВЛЕНИЕ НА ОСВЕТЛЕНИЕТО.....	153
17. ОСВЕТИТЕЛИ – УСТРОЙСТВО И ВИДОВЕ.....	160
18. СВЕЛОТЕХНИЧЕСКИ ХАРАКТЕРИСТИКИ И СВЕЛОТЕХНИЧЕСКА КЛАСИФИКАЦИЯ НА ОСВЕТИТЕЛИТЕ. СТЕПЕН И КЛАС НА ЗАЩИТА....	165
19. КОНТРАСТ И ВИДИМОСТ. ЗАСЛЕПЯВАНЕ. ПУЛСАЦИИ НА СВЕТЛИННИЯ ПОТОК. ФОТОБИОЛОГИЧНА БЕЗОПАСНОСТ НА ЛАМПИ И ОСВЕТИТЕЛИ	173
20. ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ИНСТАЛАЦИИ НА ОСВЕТИТЕЛНИ УРЕДБИ.....	190
ЛИТЕРАТУРА	196

ИЗПОЛЗВАНИ СЪКРАЩЕНИЯ

- АЧТ – Абсолютно черно тяло
ВАХ – Волт-амперна характеристика
ЕПРА – Електронна пусково-регулираща апаратура
ЖЛВН – Живачна лампа с високо налягане
ЗУ – Запално устройство
КЛЛ – Компактна луминесцентна лампа
ЛЛ – Луминесцентна лампа
к.п.д. – Коефициент на полезно действие
МХЛ – Металхалогенна лампа
НЛ – Нажежаема лампа
НЛВН – Натриева лампа с високо налягане
НЛНН – Натриева лампа с ниско налягане
НХЛ – Нажежаема халогенна лампа
ПРА – Пусково-регулираща апаратура
СИ – Светлинен източник
СРК – Светлоразпределителна крива
ССТ – Correlated Colour Temperature, Корелирана цветна температура
CIE – Commission Internationale de L'éclairage / International Commission on Illumination, Международна комисия по осветление
CRI – Colour Rendering Index, Индекс на цвето предаване
DALI – Digital Addressable Lighting Interface, Цифров адресируем интерфейс за осветление)
IR – Infrared, Инфрачервен
LED – Light Emitting Diode, Светодиод
UGR – Unified Glare Rating, Обобщена степен на заслепяване
UV – Ultraviolet, Ултравиолетов

1. ФИЗИЧНИ ОСНОВИ НА СВЕТЛИНАТА. ИЗЛЪЧВАНЕ И ЛЪЧИСТ ПОТОК. ПРИЕМНИЦИ НА ЛЪЧИСТА ЕНЕРГИЯ

1.1. Физични основи на светлината

Светлината притежава физически свойства както на електромагнитна вълна, така и на частица. Двойственият вълново-корпускулярен характер е една от фундаменталните концепции в квантовата механика. В историята на науката има много изследвания, разглеждащи въпроса за същността на светлината, които доказват проявата на свойствата на електромагнитна вълна – цвят, интерференция, дифракция, или на частица – поток от фотони, фотоелектричен ефект, луминесценция и др.

Основните поддръжници на вълновата теория за светлината са Хюйгенс и Хук. Хюйгенс създава цялостната вълнова теория за светлината и успява да обясни отражението и пречупването, предполагайки, че светлината се разпространява по-бавно в стъкло или вода, отколкото във въздух. Противоположно на това, поддръжник на корпускулярната теория за светлината е Нютон, който успява да обясни законите на отражението и пречупването, но законът за пречупването се основава на грешната хипотеза, че светлината се движи по-бързо във вода или стъкло, отколкото във въздуха. Нютон осъзнава предимствата на вълновата теория на светлината, тъй като тя обяснява цветовете, образувани от тънки филми, които той е изучавал много задълбочено. Независимо от това, той отхвърля вълновата теория, поради праволинейното разпространение на светлината. По негово време все още не се наблюдава дифракцията на светлинни лъчи. През 1801 г. Йънг развива вълнова теория на светлината, като въвежда идеята за интерференцията. Съществен принос в приемане на вълновата теория на светлината има Френел, който провежда експерименти върху интерференцията и дифракцията. През 1850 г. Фуко измерва скоростта на светлината във вода и установява, че тя е по-ниска от тази във въздуха, с което се отхвърля корпускулярната теория на Нютон за светлината [19,73].

Важен момент в развитието на теорията за светлината през XIX в. е съпоставянето на законите на електричеството и магнетизма с тези на светлината, направено през 1860 г. от Максвел. Въз основа на теоретични изследвания Максвел показва, че във вакуум (в безвъздушно пространство) скоростта на разпространение на електромагнитните вълни и светлината е еднаква $c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. Теорията на Максвел е експериментално потвърдена от Херц, Колрауш и Вебер [19,73].

Важни характеристики на вълновата теория за светлината са честотата f и дължината λ . Честотата на електромагнитната вълна е степента ѝ на трептене и се измерва в херц [Hz]. Дължината на вълната е разстоянието между две последователни точки с еднаква фаза и се измерва в метри [m].

Тези две величини са еквивалентни, тъй като между тях съществува следната взаимовръзка:

$$\lambda = \frac{v}{f}, \quad (1.1)$$

където v е скоростта на разпространение на електромагнитната вълна в материална среда и се измерва в [m/s]. Ако електромагнитните вълни се разпространяват в материална среда, характеризираща се със своя показател на пречупване n , то скоростта им в тази среда е $v = c / n$. Скоростта на разпространение на светлината във въздух е $v = 2,99702547 \cdot 10^8$ m/s – с 1,0003 пъти по-ниска от тази във вакуум.

В края на XIX в. се откриват нови светлотехнически явления и закони, които не могат да се обяснят с класическата електромагнитна теория, като закона за спектралното разпределение на лъчистата енергия на абсолютно черно тяло, фотоелектричния ефект, светлинното налягане и др. Планк изказва своята хипотеза през 1900 г. за дискретния характер на излъчването: светлината се излъчва и поглъща непрекъснато на „порции“, като минималното количество енергия на една „порция“ Планк нарича *квант енергия* ε , която количествено се определя с изрази:

$$\varepsilon = hf, \quad (1.2)$$

където h е константа на Планк; $h = 6,62607015 \cdot 10^{-34}$ Js [88].

В началото на XX в. Айнщайн създава нова фотонна теория за светлината, според която светлината представлява поток от частици, наречени фотони. Всеки фотон притежава определена енергия, импулс и маса. Както излъчването, така и разпространението и поглъщането на светлината се осъществява под формата на фотони, т.е. има дискретен характер. С помощта на фотонната теория успешно се обясняват редица сложни явления, като фотолуминесценция, фотоелект, интерференция, дифракция, поляризация, абсорбция на светлината и др. [19,73].

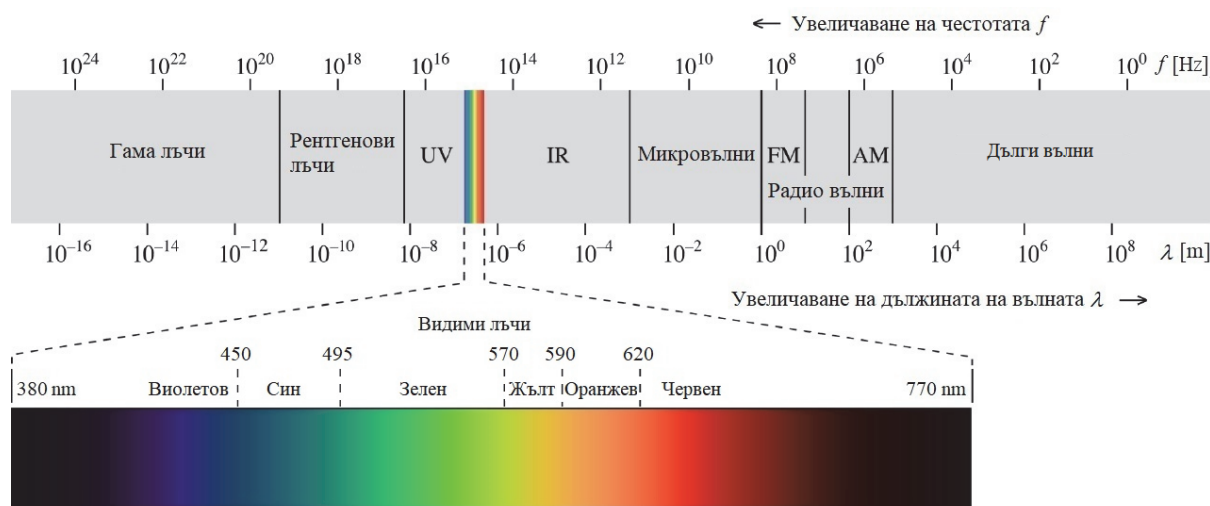
Хайзенберг дефинира принципа на неопределеността, а Бор изказва предположение, че вълновата функция на електрона, която се изменя във времето и пространството по определен закон, е мярка на вероятността за пребиваване на електрона в дадена точка и даден момент. Проведените експерименти от Дейвисън, Гермър и Томпсън доказват, че електроните имат двойствен характер – освен известните свойства на частици, те проявяват и характерните за вълните интерферентни и дифракционни свойства [19].

Непрекъснато се допълва информацията за свойствата на светлината, непрекъснато се изменят и усъвършенстват теориите за възникването и разпространението на светлината. Съвременната теория на квантовата механика на светлинното излъчване приема факта, че светлината притежава двойствен характер [73].

1.2. Излъчване илъчист поток. Видове електромагнитни спектри

Всички електромагнитни излъчвания имат една и съща природа и във вакуум се разпространяват с еднаква скорост ($c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s) [19,73]. Характеристиките, които ги правят различни, са тяхната честота f , т.е. тяхната дължина на вълната λ . Обхватът на електромагнитните излъчвания е показан на фиг. 1.1. Оптичната част на електромагнитния спектър обхваща:

- ултравиолетови (UV) излъчвания – от 10 nm до 380 nm;
- видими (за човешкото око) излъчвания – от 380 nm до 770 nm;
- инфрачервени (IR) излъчвания – от 770 nm до $340 \cdot 10^3$ nm.



Фиг. 1.1. Спектър на електромагнитното излъчване

Няма ограничения за дължината на вълната на електромагнитното излъчване, т.е. от теоретична гледна точка всички дължини (честоти) на вълните са възможни. Трябва да се има предвид, че интервалите на дължината на вълната, в които електромагнитният спектър се разделя, понякога не са добре дефинирани и често се припокриват. Например, електромагнитни вълни с дължина на вълната от порядъка на 0,1 nm често се наричат рентгенови лъчи (X-лъчи), но ако се получават от радиоактивен разпад, те се наричат гама лъчи (γ -лъчи) [73].

Всяко тяло с температура, по-голяма от абсолютната нула, излъчва в пространството енергия. Енергията на лъченията в оптичната част на електромагнитния спектър се нарича лъчистата енергия Q_e и се измерва в джаул [J] или във ватсекунда [Ws]. Лъчистият поток Φ_e характеризира излъчената, отдадената или получената лъчиста енергия за единица време:

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}, \quad (1.3)$$

където dQ_e е лъчиста енергия, излъчена, отдадена или получена за време dt , през което излъчването може да се приеме за равномерно [19,27,55].

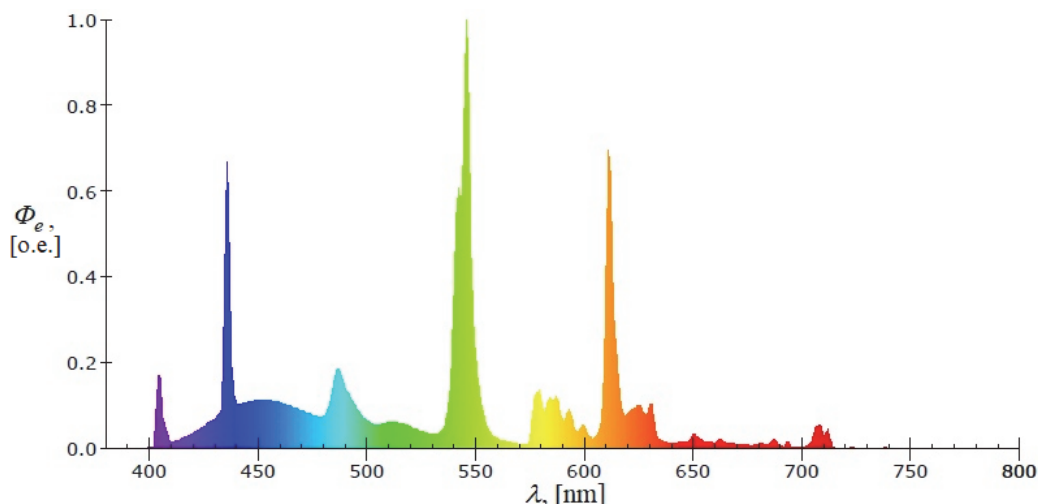
В случая се пренебрегва квантовата дискретност на излъчването, тъй като се приема за непрекъснато. Причината за това е в малката стойност на енергията на фотоните на оптичните излъчвания, в резултат на което дори и маломощните излъчвания се характеризират с голямо количество излъчени фотони – например, нажежаема лампа с мощност 100 W излъчва в пространството повече от $5 \cdot 10^{22}$ фотона за секунда [19].

Средната стойност на лъчистия поток за интервал от време t се определя с израза:

$$\Phi_{e,cp} = \frac{Q_e}{t}, \quad (1.4)$$

където Q_e е излъчената, отдадената или получената лъчиста енергия за време t .

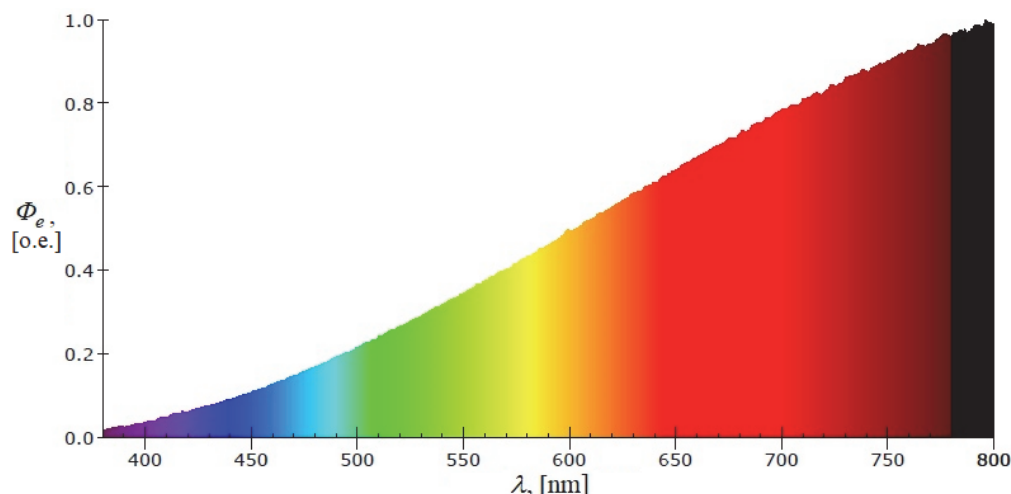
Лъчистият поток се характеризира с разпределение във времето, в пространството и по спектър. Той се измерва във ват [W].



Фиг. 1.2. Линеен спектър на излъчване

Когато излъчването е за определена дължина на вълната λ или в много тесен участък от спектъра $\Delta\lambda$, например за спектрални линии, се нарича *еднородно* или *монохроматично излъчване*. Когато излъчването е съвкупност от различни еднородни излъчвания, се нарича *сложно излъчване*. Излъчването на реалните светлинни източници е сложно, тъй като е съвкупност от различни монохроматични излъчвания [19,27]. Сложното излъчване, в зависимост от спектралното разпределение, може да образува сложно излъчване с *линеен спектър* (фиг. 1.2) или сложно излъчване с *непрекъснат спектър* (фиг. 1.3).

Линейният спектър е характерен за разрядни светлинни източници, при които електрическата дъга се наблюдава в инертни газове или метални пари (луминесцентни и компактни луминесцентни лампи, живачни лампи, натриеви лампи и др.).



Фиг. 1.3. Непрекъснат спектър на излъчване

Лъчистият поток на източници с линеен спектър се определя от сумата на еднородните (спектрални) лъчисти потоци на отделните линии $\Phi_{e,\lambda 1}, \Phi_{e,\lambda 2}, \dots, \Phi_{e,\lambda n}$, т.е.:

$$\Phi_e = \Phi_{e,\lambda 1} + \Phi_{e,\lambda 2} + \dots + \Phi_{e,\lambda n}. \quad (1.5)$$

Непрекъснатият спектър на излъчване се представя като съвкупност от плътно разположени един до друг еднородни лъчисти потоци $\Phi_{e,\lambda}$. Непрекъснатият спектър е характерен за източници с топлинно излъчване (нажежаеми и нажежаеми халогенни лампи) и за излъчващи чрез луминесценция твърди и течни тела [27].

За количествена оценка на спектралното разпределение на лъчистия поток се използва величината спектрална интензивност на лъчистия поток:

$$\Phi_{e,\lambda} = \frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda}, \quad (1.6)$$

където $d\Phi_e(\lambda)$ е лъчистият поток, излъчен в частта на спектъра $d\lambda$ [53,57].

Спектралната интензивност на лъчистия поток се измерва в $[\text{W} \cdot \text{nm}^{-1}]$.

Ако се интегрира функцията $\Phi_{e,\lambda}$ за произволен интервал от оптичния спектър, се получава лъчистият поток:

$$\Phi_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e,\lambda} d\lambda. \quad (1.7)$$

При неизвестен математичен израз за спектралната интензивност на лъчистия поток $\Phi_{e,\lambda}$, изчислението се извършва по:

$$\Phi_e = \sum_{i=1}^n \Phi_{e,\lambda_i} \Delta\lambda_i. \quad (1.8)$$

1.3. Приемници на лъчиста енергия

Приемниците на лъчиста енергия играят важна роля в улавянето и преобразуването на светлинната енергия в електрическа или друга форма на енергия. Приемниците на лъчиста енергия могат да се разделят на два вида – *биологични* и *физични*.

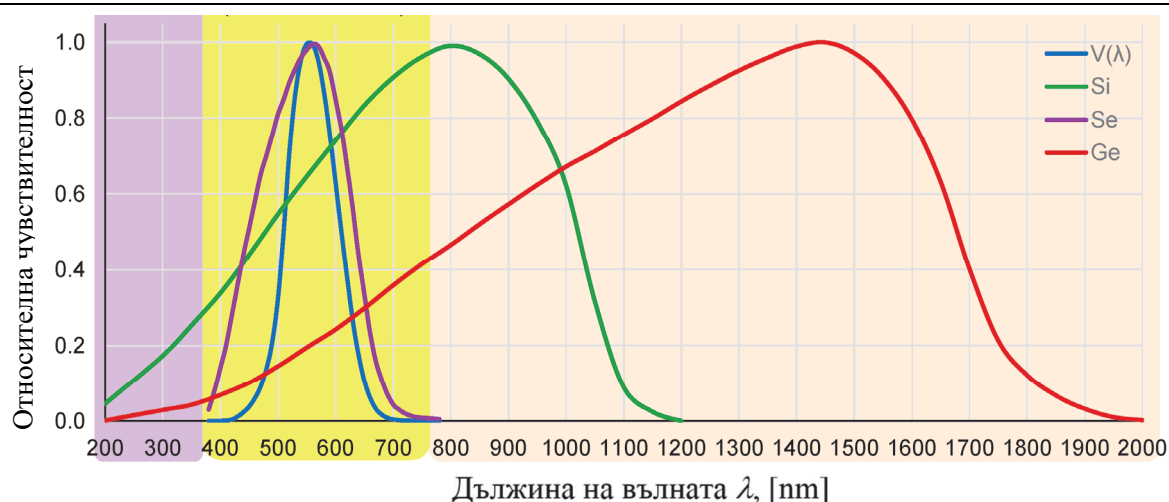
Биологични приемници на лъчиста енергия са очите на хора и животни, листата на растения, кожата на живи организми, някои бактерии и др. Съществен за осветителната техника приемник на лъчиста енергия е човешкото око, чието устройство и спектрални характеристики подробно се разглеждат в т. 2 на настоящия учебник.

Физични приемници на лъчиста енергия са луминесцентните материали (люминофори), фотоелементите (фотосензори, фотодетектори), фотоволтаичните клетки и др.

Люминофорите приемат ултравиолетова (UV) или друга високоенергийна светлина и я преобразуват във видима светлина. Такъв процес се използва в луминесцентните лампи и някои LED технологии.

Основното приложение на фотоелементите в осветителната техника е като светлочувствителен датчик (фотодетектор) в уредите за измерване на светлинни величини - луксметри и яркомери, в които той е основният компонент, който реагира на светлината. Фотодетекторът обикновено е фотодиод, фототранзистор или фотоелемент, който преобразува светлинната енергия в електрически сигнал. Принципът им на работа се основава на явлението фотоелектричен ефект. Основните характеристики на фотоелементите са спектрална чувствителност, линейност, инертност, стареене, температурна зависимост и косинусова зависимост (ако се използват за луксметри).

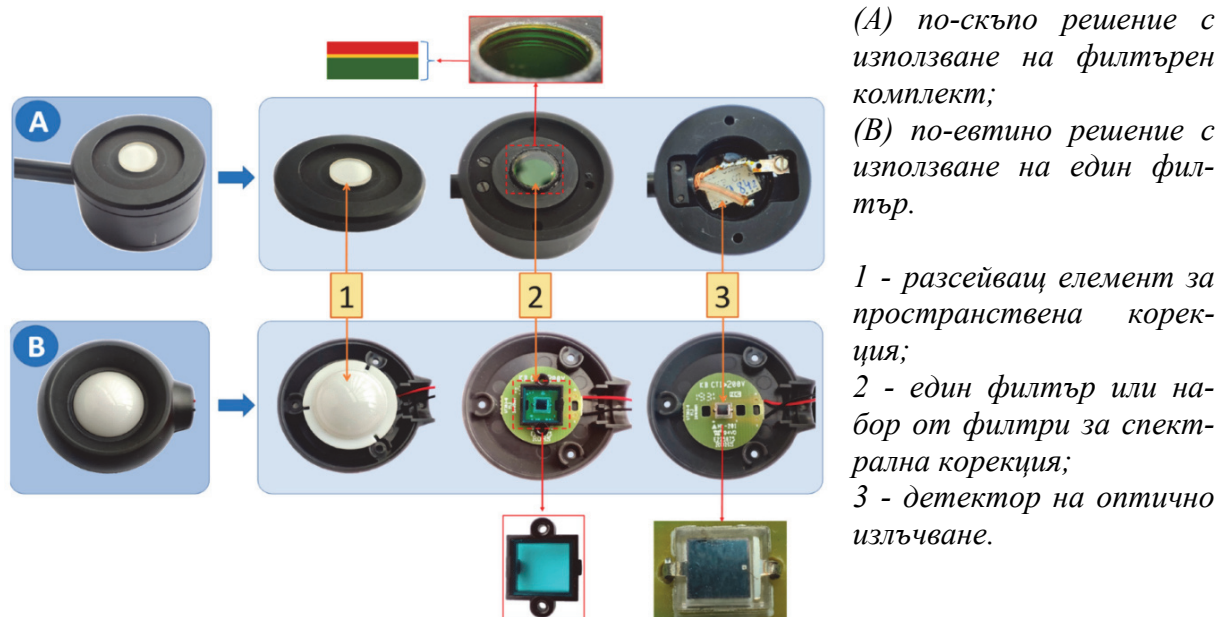
Една от най-важните характеристики на луксметрите и яркомерите е тяхната спектрална чувствителност. За да се осигури необходимата точност трябва да се използват фотоелементи, чиито спектрални характеристики се различават минимално със спектралните характеристики на окото, т.е. фотоелектричните приемници на луксметри и яркомери трябва да са коригирани по относителната спектрална светлинна ефективност на стандартния фотометричен наблюдател за дневно виждане $V(\lambda)$ и за нощно виждане $V'(\lambda)$ (фиг. 2.5) (при измерване на осветености $< 1 \text{ lx}$) с допустима грешка $\leq 5 \%$, които са показани в т. 2 на настоящия учебник. На фиг. 1.4 са показани спектралните характеристики (чувствителност) на основните видове фотодетектори, използвани в уреди за светлинни измервания и на човешкото око.



Фиг. 1.4. Спектрална чувствителност на някои видове фотодетектори и на човешкото око: дневно (фотопично) зрение $V(\lambda)$, Si—силиций, Se—селен и Ge—германий. [86]

В миналото е бил използван селен (Se) и по-рядко германий (Ge), а в момента най-често се използват силициеви (Si) фотодетектори. Фиг. 1.4 показва значителни отклонения в спектралните характеристики на детекторите от необходимата $V(\lambda)$ крива. Чувствителността на детектора зависи от материала, от който е направен. Кривата на селена показва най-близката форма до $V(\lambda)$ кривата, поради което през миналия век селеновите детектори са използвани често във фотометрите. Проблем при тях е висока чувствителност към температурата на околната среда, което е съществен недостатък, поради което вече рядко се използват в практиката.

Силициевите фотодетектори имат чувствителност в цялата видима част от спектъра и са по-малко чувствителни към температурни промени. Затова са най-често използвани в съвременните луксметри (фиг. 4.2) и яркомери (фиг. 4.6), като е необходимо да се настрои спектралната му чувствителност спрямо кривата $V(\lambda)$. Ако фотометричната глава на луксметър не е правилно регулирана спектрално, не е възможна обективна оценка на осветеността. Тази настройка се извършва с помощта на коригиращи филтри, които абсорбират радиация както в дългите, така и в късовълновите части на спектъра. Поради съществените разлики във формите на кривите на силициевия детектор и кривата $V(\lambda)$, за да се извърши на практика спектралната корекция е необходимо да се използва комбинация от няколко филтъра. Тези филтри (с подходящо избрани дебелини) се поставят един върху друг и след това се поставят върху фоточувствителната повърхност на детектора. Използването на набор от правилно подбрани филтри значително увеличава цената на луксметъра. При по-евтините луксметри спектралната корекция обикновено се извършва с един филтър. Примери за технически решения за фотометрични глави на съвременни луксметри са показани на фиг. 1.5.



Фиг. 1.5. Примерни фотометрични глави на луксметри[86]

В стандартите ISO/CIE 19476:2014, CIE 231:2019 и DIN 5032-7 (табл. 1.1) са дефинирани класове на точност на фотодетекторите по отношение на съответствието на спектралната им чувствителност f_1' към тази на човешкото око чрез показателя „ f_1' error“ или „ $V(\lambda)$ match f_1' “.

Табл. 1.1. Класове на спектрална точност на фотодетектори

	Class L	Class A	Class B	Class C
f_1' error	1,5%	3%	6%	9%

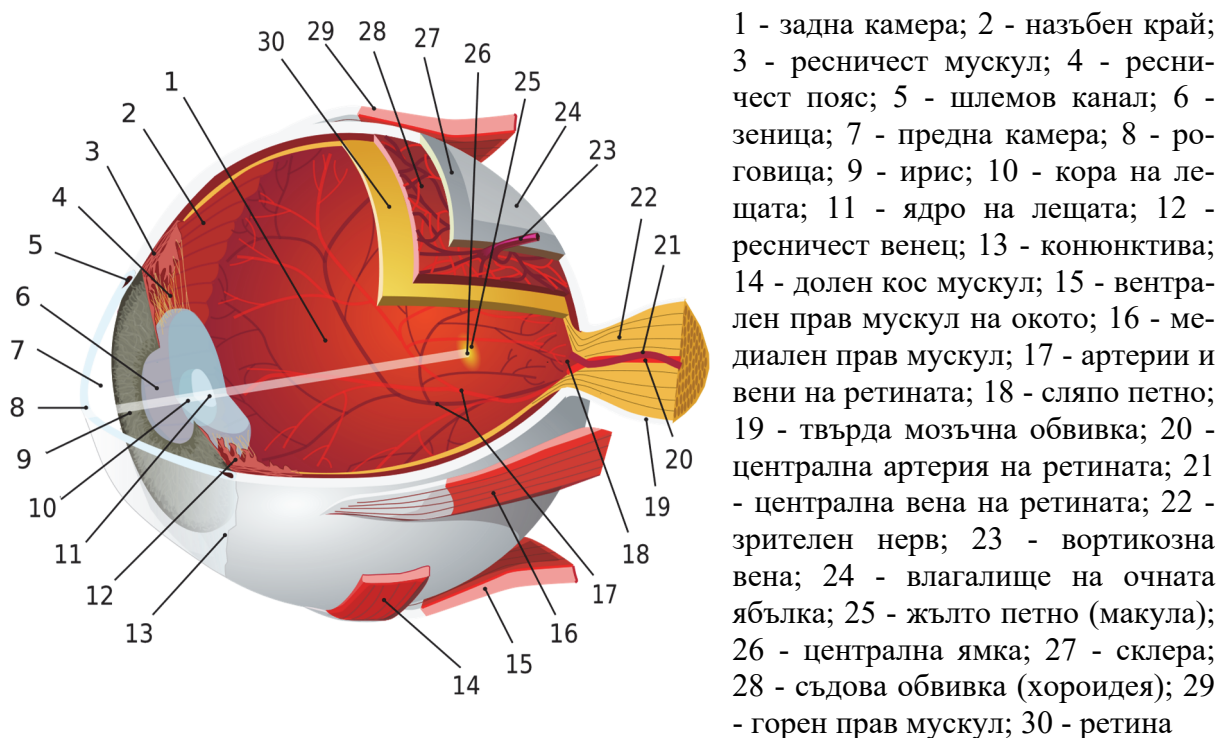
Поради факта, че светлинният поток попада под различни ъгли върху фотометричните глави на луксметъра, освен спектралната корекция е необходимо да се извърши и пространствена корекция, поправяща т.нар. косинусова грешка, т.к. стойността на регистрираната от детектора осветеност намалява с множител – косинуса на ъгъла на падане на светлината върху него. За тази цел се използва дифузионен елемент (елемент “1” на фиг. 1.5), който е плосък диск (решение “А” на фиг. 1.5) или купол – част от полусфера (решение “В” на фиг. 1.5). На практика това са най-често използваните решения за намаляване на грешките при измерване при косо падане на светлината. При поставяне на такива дифузионни елементи, наричани също и косинусова приставка, попадналите лъчи се разсейват от цялата ѝ вътрешна повърхност и се насочват успоредно върху повърхността на фотоелемента, с което се огранича косинусовата грешка.

2. ОСНОВНИ ЗРИТЕЛНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ. СПЕКТРАЛНА ЕФЕКТИВНОСТ НА ЧОВЕШКОТО ЗРЕНИЕ

2.1. Устройство на човешкото око

Човешкият зрителен орган, наричан око, е сетивен орган със сложен физиологичен строеж и оптична система, който притежава способността да възприема електромагнитното излъчване в интервала на видимата област от 380 nm до 770 nm и да осигурява основната сетивна и когнитивна функция – зрението. Между 75 % и 80 % от постъпващата информация от околната среда (форма, големина, отдалеченост, движение, ниво на яркост и цвят) се възприема от човешкото око [19]. Процесът на осветяване и виждане се осъществява посредством три основни елемента – светлинен източник, осветяван обект (който се вижда) и око, което получава светлинна енергия и я преобразува в образи, които се предават до мозъка за тяхната интерпретация [73].

На фиг. 2.1 е представено принципното устройство и основните елементи на човешкото око [103].



Фиг. 2.1. Устройство на човешкото око

Към периферната част на окото се причисляват очната ябълка и нейните елементи – клепачи, слъзен апарат, конюнктива, орбита и двигателен апарат. Склерата представлява външната обвивка на очната ябълка, която е плътна, механично устойчива и непрозрачна. Тя предпазва окото от външ-

ни въздействия и поддържа неговата форма. Зрителната ос на окото може да се отклонява във вертикалната и хоризонталната равнина до $(45 \div 50)^\circ$ от своето средно положение посредством свързаните със склерата мускулни влакна. Светлината прониква във вътрешността на окото през предната и малко изпъкнала част на външната обвивка, която се нарича роговица (корнеа). Роговицата има голяма оптична сила D , според различните автори $D = (38 \div 46)$ диоптъра (1 диоптър е равен на 1 m^{-1}); показателят на пречупване на роговицата е $n = 1,37$ [37]. Зад роговицата е разположена предната камера на окото, която е запълнена с прозрачна течност, отделена посредством лещата от задната камера, която от своя страна е запълнена със стъкловидна маса. Оптичната сила на лещата може да се изменя в границите от 16 диоптъра в спокойно състояние до 33 диоптъра при поглед в близост; показателят на пречупване на лещата е $n = 1,44$. Съдовата обвивка (хороида) е разположена непосредствено под склерата. В непосредствена близост до лещата хороида преминава в тънък слой с плоска венецообразна форма – ирис, който е разположен във фронталната плоскост на лещата. Отворът в средата се нарича зеница. Големината му се изменя в зависимост от интензивността на светлината. Роговицата, лещата и зеницата образуват оптичната система на окото. Зеницата изпълнява функции на диафрагма, а роговицата създава основната пречупвателна сила (около 70 %). Акомодацията, т.е. способността на окото да се приспособява (фокусира) за виждане на предмети, намиращи се на различно разстояние от него, се осъществява от лещата [19].

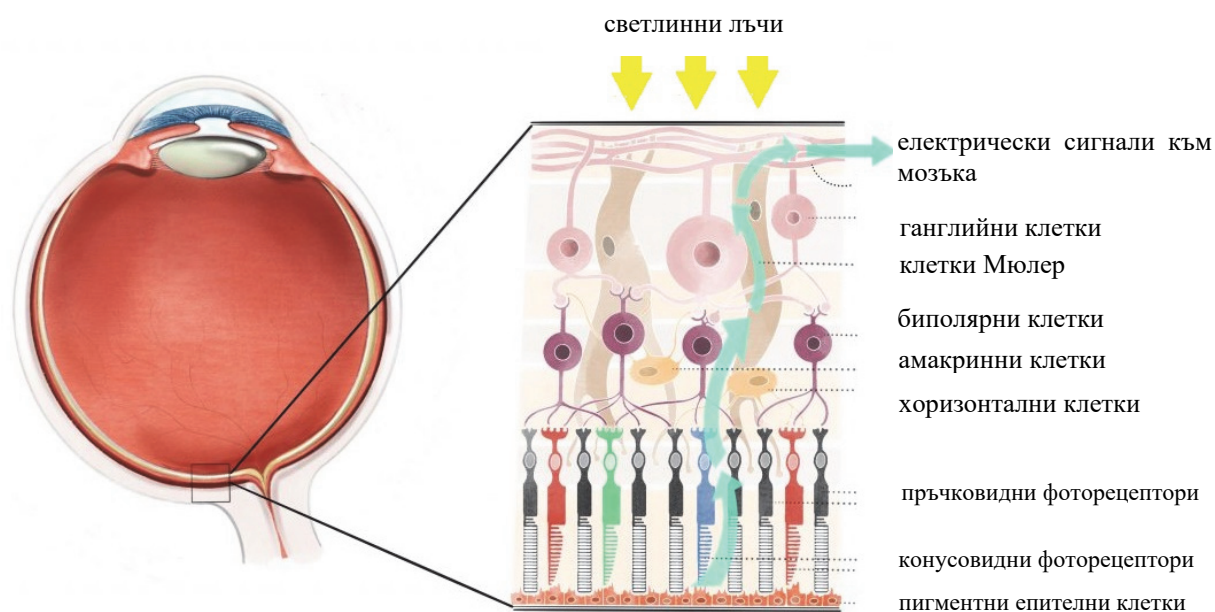
2.2. Спектрална светлинна ефективност на човешкото око

Светлочувствителният слой на окото, разположен върху вътрешната повърхност на съдовата обвивка (фиг. 2.1), се нарича ретина. Ретината представлява периферната част на зрителния анализатор, където се извършва възприемането и преобразуването на електромагнитното излъчване от видимата част на спектъра в нервни импулси и се осъществява първичната им обработка. На фиг. 2.2 е показана структурата на ретината в човешкото око [108]. Фоторецепторните клетки в ретината се разделят на пръчковидни и конусовидни, като най-високата им концентрация е в областта на макулата. Другите видове клетки служат за предаване на електрически сигнали към мозъка [89].

Конусовидните клетки (в някои литературни източници се наричат колбички) в ретината на човешкото око са между 6 и 7 милиона. Хората нормално имат три вида конусовидни клетки в ретината, обозначени с L, M и S, съответно за дълги (long), средни (medium) и къси (short) дължини на вълната. L-, M- и S-конусите са от един и същи тип фоторецепторни клетки, но с различни пигменти, благодарение на което в центровете на мозъка се определя от коя част на спектъра е зрителното усещане, т.е. конусовидните клетки са чувствителни към цветовете. L-конусите, които са

най-многобройни от трите вида конусовидни клетки, реагират най-много в червената област на видимия спектър, достигайки максимум за различните хора в интервала $\lambda = (564 \div 580) \text{ nm}$. М-конусите, които са вторият най-често срещан тип от конусовидните клетки, реагират най-много в жълтата и зелената област на спектъра, достигайки максимум в интервала $\lambda = (534 \div 545) \text{ nm}$. Най-малобройни от конусовидните клетки са S-конусите, които реагират най-много на синята светлина от спектъра, достигайки максимум в интервала $\lambda = (420 \div 440) \text{ nm}$. При хора с нарушено цветно зрение, наричано далтонизъм, липсват един или няколко от тези фоторецептори. На конусовидните L-, M- и S-рецептори се основава т.нар. фотопично или „дневно“ зрение (виждане), което се проявява при високо ниво на яркостта на обектите през деня – $L \geq 5 \text{ cd/m}^2$ [32,61,89].

Пръчковидните R-клетки в ретината на човешкото око достигат приблизително 92 милиона. Те са много силно светлочувствителни – приблизително 100 пъти повече в сравнение с конусовидните клетки, но не са чувствителни по отношение на цветовете. На пръчковидните клетки се основава т.нар. скотопично или „нощно“ зрение, което се проявява при ниско ниво на яркостта на обектите през нощта – $L < 0,005 \text{ cd/m}^2$ [62,89].



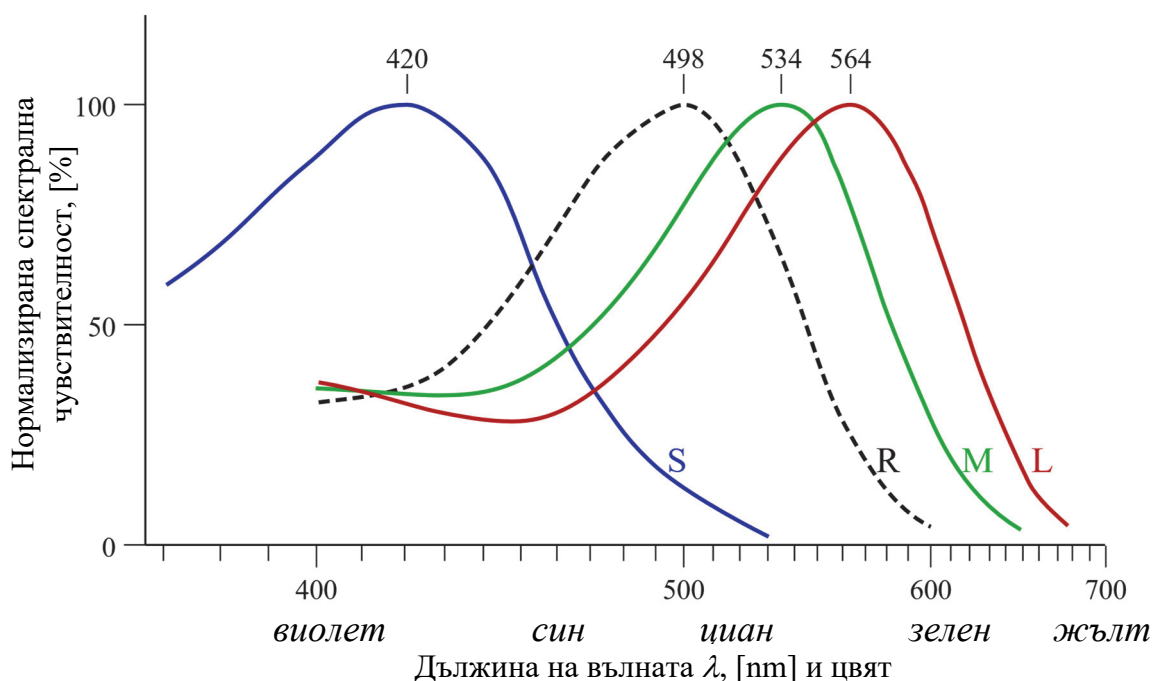
Фиг. 2.2. Микроскопичен изглед на видовете клетки в ретината

Когато окото на човек се адаптира към нива на средна яркост между границите на фотопичното (5 cd/m^2) и скотопичното зрение ($0,005 \text{ cd/m}^2$), например при здрач, то се нарича мезопично. При мезопичното зрение едновременно са активни и пръчковидните, и конусовидните фоторецепторни клетки.

Няма точни граници за спектралния диапазон на видимото излъчване, тъй като те зависят както от количеството на лъчистия поток, достигащ

до ретината, така и от индивидуалната чувствителност на човешкото око, която е минимална в двата края на видимия диапазон от електромагнитния спектър. Международната комисия по осветление (CIE) посочва като долна граница на видимото излъчване между 360 nm и 400 nm, а горната граница е между 760 nm и 830 nm [52]. Човешкото око не възприема излъчванията като светлинни извън вълновия диапазон (360 ÷ 830) nm.

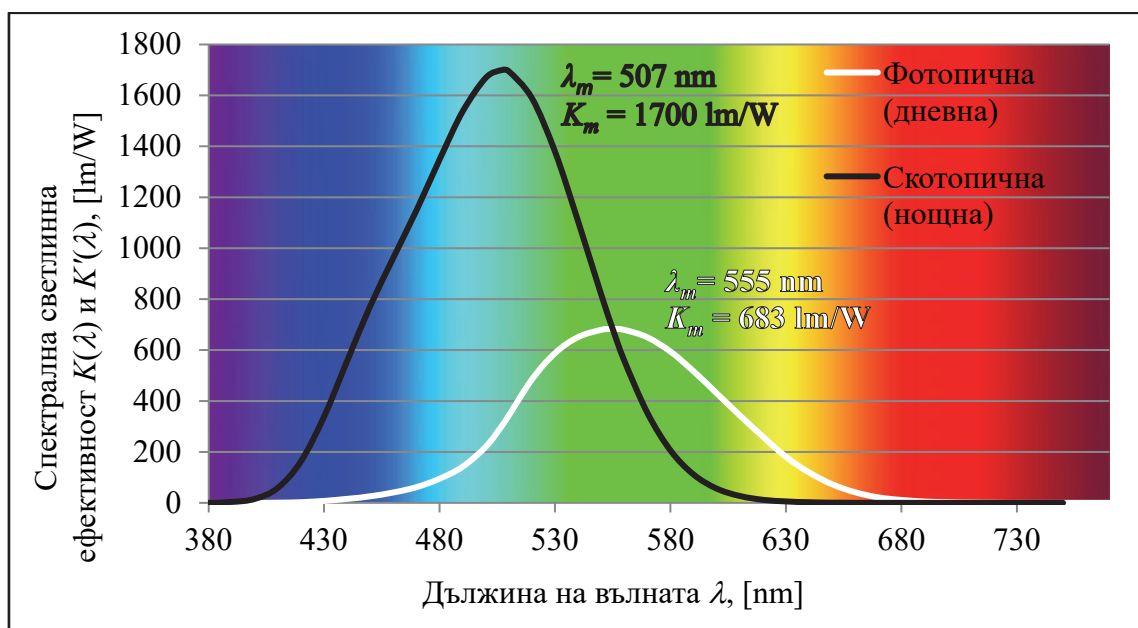
Сумата от излъчванията във видимия спектър се възприемат от окото като бяла светлина, например слънчевата светлина на обяд. Ако всички дължини на вълната от видимия спектър достигнат човешкото око едновременно и с еднаква интензивност, то се получават кривите от фиг. 2.3, които характеризират т.нар. нормализирана спектрална чувствителност на четирите вида фоторецептори – пръчковидни R и конусовидни L, M и S [41,73,102].



Фиг. 2.3. Нормализирана спектрална чувствителност на четирите вида фоторецептори в ретината на човешкото око

Спектралната светлинна ефективност за фотопично зрение $K(\lambda)$ (бялата крива) и спектралната светлинна ефективност за скотопично зрение $K'(\lambda)$ (черната крива) на човешкото око са представени на фиг. 2.4. Максималната светлинна ефективност за фотопично зрение е $K_m = 683 \text{ lm/W}$ и съответства при дължина на вълната $\lambda_m = 555 \text{ nm}$, което е в областта на жълто-зеления цвят. Максималната светлинна ефективност за скотопично зрение е $K'_m = 1700 \text{ lm/W}$ и съответства при дължина на вълната $\lambda_m = 507 \text{ nm}$, което е в областта на синьо-зеления цвят. Тази характерна за фоторецепторните клетки особеност на изместване на максимума към по-

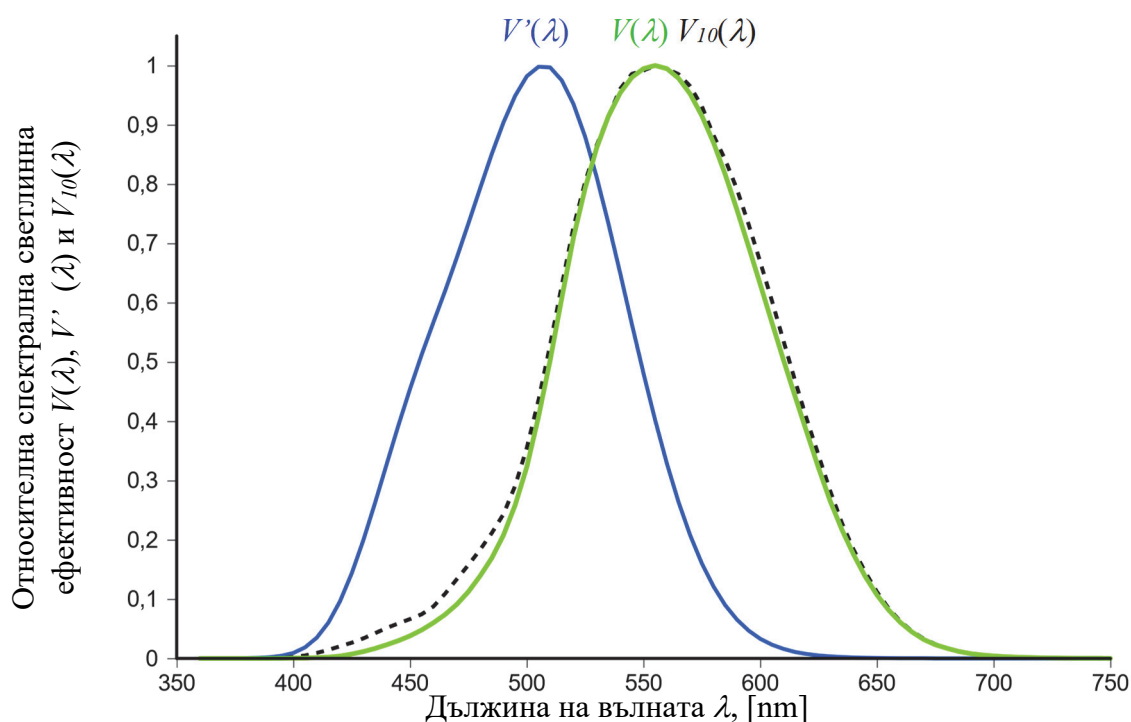
късовълновата област на спектъра при нощно зрение е известна като ефект на Пуркине [73]. Спектралната светлинна ефективност за мезопично зрение се означава с $K_{mes;m}(\lambda)$, където m е коефициент, определен от нивото на визуална адаптация. Спектралната светлинна ефективност на човешкото око за фотопично и скотопично зрение зависи от редица фактори, особено от състоянието на зрителна адаптация и размера и местоположението на светлинния източник в зрителното поле.



Фиг. 2.4. Фотопична и скотопична спектрална светлинна ефективност на човешкото зрение

CIE въвежда относителната функция на спектрална светлинна ефективност при различните нива на яркост – за фотопично $V(\lambda)$, за скотопично $V'(\lambda)$ и за мезопично $V_{mes;m}(\lambda)$ зрение. Функцията на относителната спектрална светлинна ефективност представлява стандартната средна спектрална чувствителност на зрителния анализатор на човека към светлината. Тя се основава на субективни преценки от излъчвания с различна дължина на вълната (различен цвят), които се възприемат от окото с различна яркост. Поради намаляване на чувствителността на рецепторите в периферията на ретината, границите на зрителното поле се изменят под въздействието на различни фактори. Зрителното поле се разширява при увеличаване на яркостта на обектите, чието изображение е в периферията на ретината, а също и при увеличаване на средната яркост на полето. Зрителното поле се стеснява при умора и заслепяване. Относителната спектрална светлинна ефективност на човешкото око се променя в зависимост от зрителния ъгъл. Когато зрителната цел има ъглово поле, по-голямо от 4° или се вижда извън зрителната ос, се въвежда т.нар. „10-градусов фотопичен фотометричен наблюдател“ с функция $V_{10}(\lambda)$ [54].

На фиг. 2.5 са показани функциите на относителната спектрална светлинна ефективност за скотопично зрение $V'(\lambda)$ ($V'(\lambda) = 1$ при $\lambda = 507$ nm) и за фотопично зрение $V(\lambda)$ и $V_{10}(\lambda)$ ($V(\lambda) = 1$ при $\lambda = 555$ nm) [54,104].



Фиг. 2.5. Функции на относителната спектрална светлинна ефективност за скотопично $V'(\lambda)$ и за фотопично $V(\lambda)$ и $V_{10}(\lambda)$ зрение

Спектралната светлинна ефективност за фотопично зрение се изразява посредством уравнението:

$$K(\lambda) = K_m V(\lambda), \quad (2.1)$$

където: K_m – максимална светлинна ефективност, която се измерва в лумени на ват [lm/W]; $V(\lambda)$ – относителна спектрална светлинна ефективност (безразмерна величина); λ – дължина на вълната [nm].

Стойността на максималната светлинна ефективност за фотопично зрение се дефинира с отношението:

$$K_m = \frac{683}{V(\lambda_{cd})} \approx 683 \text{ lm/W}, \quad (2.2)$$

където $V(\lambda_{cd}) = 1$ е относителната спектрална светлинна ефективност при дължина на вълната във въздух $\lambda_{cd} = 555$ nm, която съответства на честота $f \approx 540.10^{12}$ Hz.

Стойностите на $K(\lambda)$ и $V(\lambda)$ за фотопично и $K'(\lambda)$ и $V'(\lambda)$ за скотопично зрение на човешкото око в областта на видимото излъчване (от 380 nm до 770 nm) са представени в табл. 2.1 [41].

Табл. 2.1. Спектрална светлинна ефективност и относителна спектрална светлинна ефективност за фотопично и скотопично зрение

λ , [nm]	Фотопично зрение		Скотопично зрение	
	$V(\lambda)$	$K(\lambda)$, [lm/W]	$V'(\lambda)$	$K'(\lambda)$, [lm/W]
380	0,000039	0,027	0,000589	1,001
390	0,000120	0,082	0,002209	3,755
400	0,000396	0,27	0,009290	15,793
410	0,001210	0,826	0,034840	59,228
420	0,004000	2,732	0,096600	164,220
430	0,011600	7,923	0,199800	339,660
440	0,023000	15,709	0,328100	557,770
450	0,038000	25,954	0,455000	773,500
460	0,060000	40,98	0,567000	963,900
470	0,090980	62,139	0,676000	1149,200
480	0,139020	94,951	0,793000	1348,100
490	0,208020	142,078	0,904000	1536,800
500	0,323000	220,609	0,982000	1669,400
507	0,444310	303,464	1	1700
510	0,503000	343,549	0,997000	1694,900
520	0,710000	484,93	0,935000	1589,500
530	0,862000	588,746	0,811000	1378,700
540	0,954000	651,582	0,650000	1105,000
550	0,994950	679,551	0,481000	817,700
555	1	683	0,402000	683
560	0,995000	679,585	0,328800	558,960
570	0,952000	650,216	0,207600	352,920
580	0,870000	594,21	0,121200	206,040
590	0,757000	517,031	0,065500	111,350
600	0,631000	430,973	0,033150	56,355
610	0,503000	343,549	0,015930	27,081
620	0,381000	260,223	0,007370	12,529
630	0,265000	180,995	0,003335	5,670
640	0,175000	119,525	0,001497	2,545
650	0,107000	73,081	0,000677	1,151
660	0,061000	41,663	0,000313	0,532
670	0,032000	21,856	0,000148	0,252
680	0,017000	11,611	0,000072	0,122
690	0,008210	5,607	0,000035	0,060
700	0,004102	2,802	0,000018	0,030
710	0,002091	1,428	0,000009	0,016
720	0,001047	0,715	0,000005	0,008
730	0,000520	0,355	0,000003	0,004
740	0,000249	0,17	0,000001	0,002
750	0,000120	0,082	0,000001	0,001
760	0,000060	0,041	0	0
770	0,000030	0,02	0	0

3. СВЕТЛИНЕН ПОТОК. ИНТЕНЗИТЕТ НА СВЕТЛИНАТА. СВЕТЛОРАЗПРЕДЕЛИТЕЛНА КРИВА

3.1. Светлинен поток

Интензивността на светлинното усещане е пропорционална на лъчистия поток Φ_e . Светлинният поток Φ се дефинира като светлинна енергия, излъчена за единица време във видимия диапазон на спектъра, т.е. излъченият лъчист поток, количествено оценен по светлинното усещане, което той предизвиква в човешкото око на стандартен фотометричен наблюдател на CIE [56]. Светлинният поток се оценява по въздействието върху окото, в зависимост от спектралната светлинна ефективност за дневно зрение $K(\lambda)$ (фиг. 2.4 и 2.5).

Светлинният поток се измерва в лумен [lm]. В резултат от измервания се установява, че светлинен поток със стойност един лумен ($\Phi = 1 \text{ lm}$) съответства на монохроматично излъчване във въздушна среда с дължина на вълната $\lambda = 555 \text{ nm}$ (честота $f \approx 540.10^{12} \text{ Hz}$), однородният лъчист поток на което е $\Phi_e(\lambda=555\text{nm}) = 1/683 \text{ W}$.

Светлинният поток на светлинен източник с однородно излъчване се определя от лъчистия поток Φ_e на излъчването и спектралната светлинна ефективност $K(\lambda)$ чрез уравнението:

$$\Phi_\lambda = K(\lambda)\Phi_e = K_m V(\lambda)\Phi_e. \quad (3.1)$$

Известно е, че спектралната светлинна ефективност $K(\lambda)$ се определя от произведението на максималната спектрална светлинна ефективност за дневно зрение K_m ($K_m = 683 \text{ lm/W}$ при излъчване с $\lambda = 555 \text{ nm}$) и относителната спектрална светлинна ефективност $V(\lambda)$ ($V(\lambda) = 1$ при излъчване с $\lambda = 555 \text{ nm}$), но също така може да се определи и с отношението на светлинния поток и лъчистия поток при однородно излъчване:

$$K(\lambda) = K_m V(\lambda) = \frac{\Phi_\lambda}{\Phi_e}. \quad (3.2)$$

Светлинният поток на светлинни източници с линеен и непрекъснат спектър на излъчване се получава от спектралното разпределение на лъчистия поток и се определя с уравнението [19,27]:

$$\Phi = K_m \sum_{i=1}^n V(\lambda_i)\Phi_e(\lambda_i). \quad (3.3)$$

Интегрирайки равенството в диапазона на видимите излъчвания на спектъра (от 380 nm до 770 nm), за светлинния поток на цялото разглеждано лъчение се получава:

$$\Phi = K_m \int_{\lambda_1=380\text{nm}}^{\lambda_2=770\text{nm}} V(\lambda) d\Phi_e(\lambda). \quad (3.4)$$

Ако се използва спектралното разпределение на лъчистия поток $\Phi_{e,\lambda}$, който характеризира разпределението на енергията в спектъра на източника на излъчване, тогава светлинният поток се определя с израза:

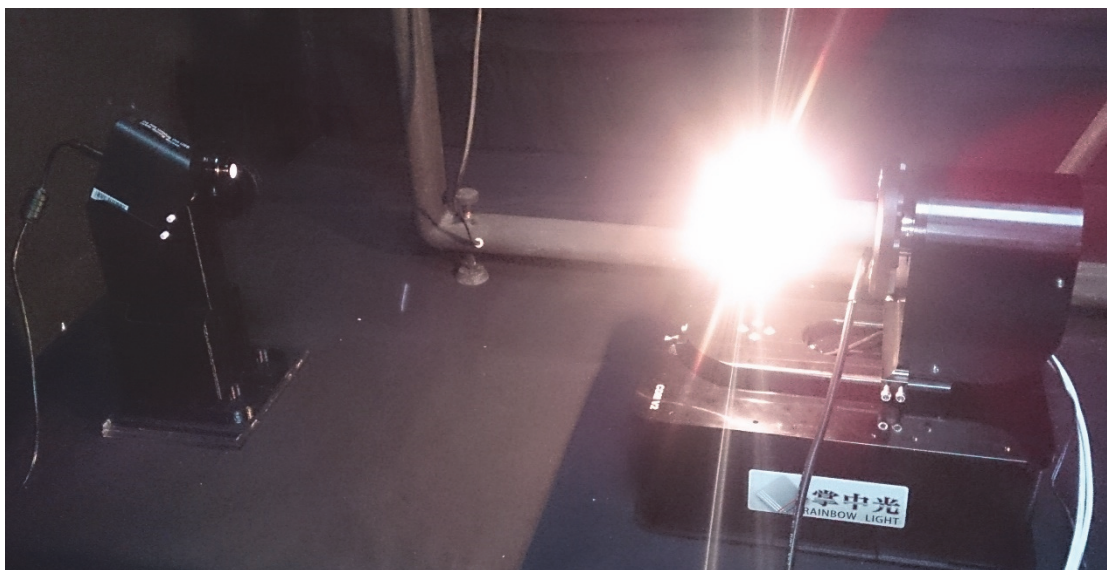
$$\Phi = K_m \int_{\lambda_1=380\text{nm}}^{\lambda_2=770\text{nm}} V(\lambda) \Phi_{e,\lambda} d\lambda, \quad (3.5)$$

където $\Phi_{e,\lambda}$ е спектралната интензивност на лъчистия поток, [W/nm].

Затруднението в измерването на светлинния поток се състои в това, че е необходимо той да се измерва, когато се излъчва във всички посоки от сферичното пространство. Измерването се извършва чрез специализирана светлотехническа апаратура – сферични фотометри (фиг. 3.1) или фотометрични гониофотометри (фиг. 3.2).



Фиг. 3.1. Интегриращ кълбов фотометър (сфера на Улбрихт) за измерване на светлинен поток



Фиг. 3.2. Фотометричен гониофотометър, използван за измерване на светлинен поток

Сферичният фотометър, показан на фиг. 3.1, е устройство, което представлява интегрираща сфера (известен като сфера на Улбрихт) с вътрешно покритие (бариев сулфат BaSO_4) с коефициент на отражение, близък до 1. Изследваният светлинен източник (СИ), излъчващ в различни посоки от пространството, се поставя в центъра на сферата. С помощта на фотоелемент със спектралната светлинна ефективност на човешкото око, монтиран в сферата, се измерва сигнал, пропорционален на осветеността на фотоелемента, която е пропорционална на светлинния поток на СИ (фотоелементът измерва само разсеяната светлина, тъй като е защитен от директните светлинни лъчи посредством екран). Чрез сравняване на полученния сигнал със сигнала от еталонен светлинен източник може да се определи абсолютният светлинен поток на измервания светлинен източник.

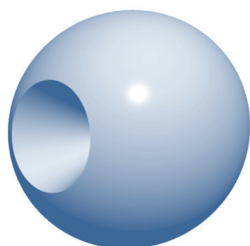
3.2. Интензитет на светлината

Светлинният поток не е пълна характеристика на излъчването на светлинните източници, тъй като в повечето случаи те излъчват неравномерно в околното пространство. Използва се величината интензитет на светлината I , която характеризира количественото разпределение на светлинния поток Φ в даден пространствен ъгъл Ω . Интензитетът на светлината представлява плътност на светлинния поток, излъчван от точковиден светлинен източник в даден пространствен ъгъл. Точковиден източник на светлина се нарича светещо тяло с безкрайно малки размери по отношение на разстоянието до приемника.

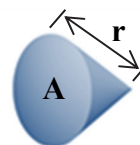
Пространственият ъгъл Ω се измерва в стерadian [sr]. Той е триизмерен еквивалент на радиан [rad], който е мярка за равнинен ъгъл. Една пълна сфера има 4π стерadianи. Един стерadian се определя като пространствен ъгъл на конус с връх в центъра на сфера с площ на повърхността

си A , числено равна на квадрата на радиуса r . Фиг. 3.3а показва разрез на сфера с отстранен от нея конусовиден пространствен ъгъл със стойност 1 sr. Фиг. 3.3б показва изглед на отстранения пространствен ъгъл $\Omega = 1$ sr, равен на площта A , разделена на квадрата на радиуса на сферата r^2 [41,87]:

$$\Omega = \frac{A}{r^2}. \quad (3.6)$$



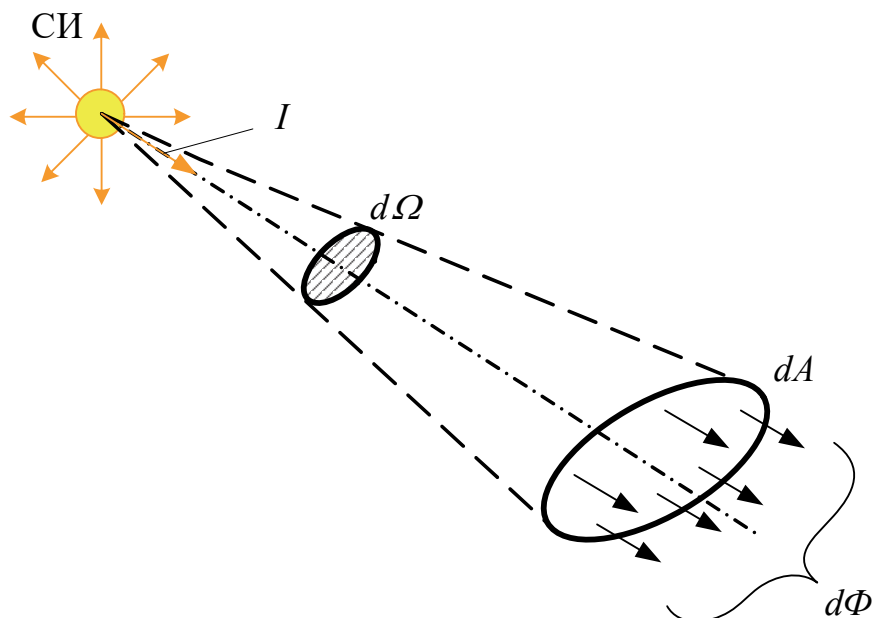
Фиг. 3.3а. Един стерadian пространствен ъгъл Ω , отстранен от сфера



Фиг. 3.3б. За пространствен ъгъл Ω с размер един стерadian $A = r^2$

Ако в малък пространствен ъгъл $d\Omega$ от светлинен източник (СИ) се излъчва светлинен поток $d\Phi$ (фиг. 3.4), то интензитетът на светлината I е:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}. \quad (3.7)$$



Фиг. 3.4. Определяне на интензитета на светлината

Интензитетът на светлината се измерва с единицата кандела [cd]:

$$1 \text{ cd} = \frac{1 \text{ lm}}{1 \text{ sr}}.$$

Единицата за интензитет на светлината е единствената светлотехническа основна единица в Международната система единици (SI). Измервателните единици на останалите светлотехнически величини са нейни производни – фиг. 4.9.

Интензитет на светлината със стойност 1 cd представлява силата на светлината в дадено направление от светлинен източник, излъчващ монохроматично лъчение с честота $f \approx 540 \cdot 10^{12}$ Hz, което съответства на дължина на вълната $\lambda = 555 \text{ nm}$, с максимална светлинна ефективност за фотопично зрение K_m , т.е. енергийната сила на светлината в това направление е:

$$1 \text{ cd} = K_m \cdot V(\lambda_{cd}) \cdot 1/683 \text{ W/sr},$$

от което следва, че: $K_m \approx 683 \text{ (cd} \cdot \text{sr)/W} \approx 683 \text{ lm/W}$ [60]. Това определение съответства на използваното в миналото: сила на светлината, излъчвана от абсолютно черно тяло, перпендикулярно на повърхността му с площ $A = 1/60 \text{ cm}^2$ при температурата на топене на платината 2042,5 K [41].

Интензитетът на светлината е различен от интензитета на излъчване, което е съответстващата физична величина в областта на радиометрията. По отношение на интензитета на излъчване, интензитетът на светлината е редуцирана фотометрична величина, която се получава с помощта на относителната спектрална светлинна ефективност $V(\lambda)$ на монохроматичното излъчване за дневно виждане. Обикновено излъчването е с повече от една дължина на вълната, при което е необходимо да се интегрира в областта на видимите излъчвания на спектъра и за интензитета на светлината се получава:

$$I = K_m \int_{\lambda_1=380\text{nm}}^{\lambda_2=770\text{nm}} I_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda, \quad (3.8)$$

където $I_{e,\lambda}$ е интензитет на излъчването, [W/sr].

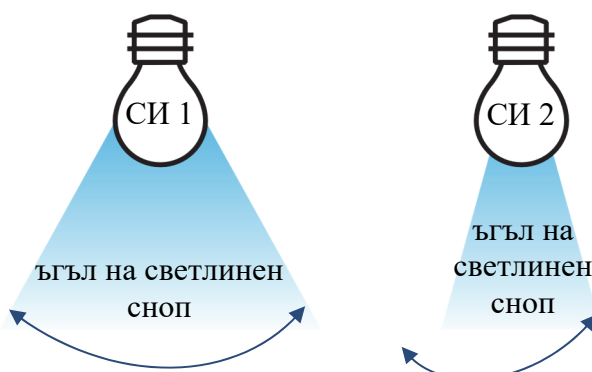
В табл. 3.1 са посочени приблизителните стойности на интензитета на светлината и активната мощност на различни светлинни източници. Например една стандартна свещ с интензитет на светлината 1 cd излъчва светлинен поток във всички посоки приблизително 12 lm.

Интензитетът на светлината определя интензивността на излъчването – колкото по-концентрирана е светлината от един светлинен източник, толкова по-интензивна е тя. Независимо, че двата светлинни източника от фиг. 3.5, условно означени като СИ 1 и СИ 2, имат еднакъв светлинен поток, те имат различен интензитет на светлината, тъй като ъгълът на свет-

линния сноп е различен – СИ 2 има по-малък ъгъл на светлинния сноп и респ. по-голям интензитет на светлината в сравнение със СИ 1.

Табл. 3.1. Интензитет на светлината на някои светлинни източници

Светлинен източник	Активна мощност P , [W]	Интензитет на светлината I , [cd]
Свещ	-	1
Нажежаема лампа	100	100
Луминесцентна лампа	22	120
Обикновен светодиод	0,1	3
Свръхярък светодиод	1	от 1 до 30
Свръхярък светодиод с колиматор	1	1 500
Слънце	$3,83 \cdot 10^{26}$	$28,4 \cdot 10^{26}$



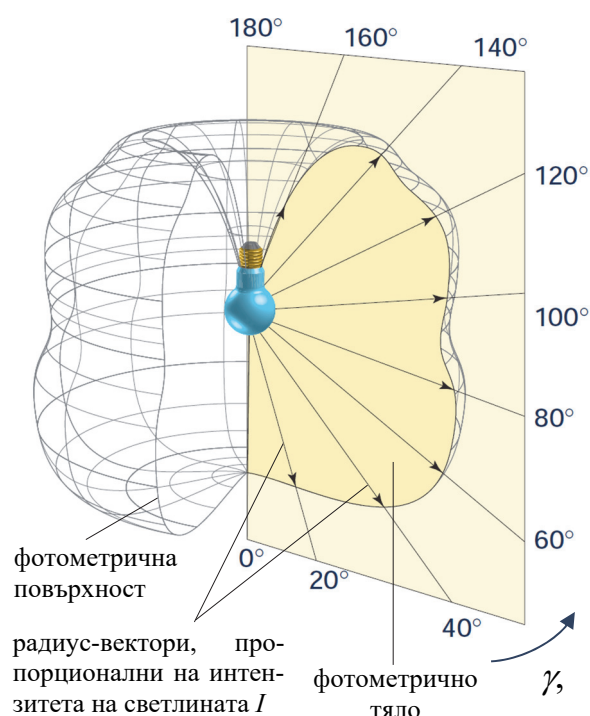
Фиг. 3.5. Светлинни източници с еднакъв светлинен поток, но с различен интензитет на светлината

3.3. Светлоразпределителна крива

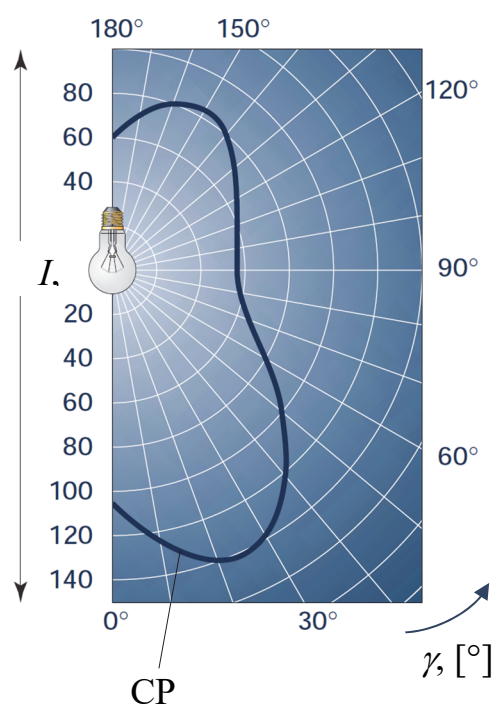
Светлоразпределението от един светлинен източник в пространството може да се представи графично чрез радиус-вектори с начало светлинния източник и големина, пропорционална на интензитета на светлината, както е показано на фиг. 3.6. Геометричното място на върховете на радиус-векторите представлява затворена повърхност и се нарича *фотометрична повърхност* на светлинния източник, а обемът, определен от тази повърхност – *фотометрично тяло*. В случай че фотометричното тяло има вертикална ос на симетрия (фиг. 3.6), светлоразпределението се нарича симетрично. Пресечните криви на всички вертикални (меридиални) равнини, прекарани през тази ос с фотометричната повърхност, са еднакви. Фотометричното тяло се получава чрез ротация на кривата около оста на симетрия [19,27].

В практиката светлоразпределението се представя чрез *светлоразпределителна крива (СРК)*, която изразява стойностите на интензитета на светлината на светлинния източник във функция от посоката на излъчване в дадена пресечна равнина на фотометричното тяло, представена най-често в полярни координати (с начало във фотометричния център) – $I = f(\gamma)$, както е показано на фиг. 3.7. Всяка точка от СРК се дефинира чрез интензитет

на светлината I и ъгъл γ , който се сключва между посоката на разпространение на светлинния лъч и оптичната ос на светлинния източник. Този фотометричен ъгъл се изменя в интервала $0^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$.



Фиг. 3.6. Фотометрично тяло на светлинен източник



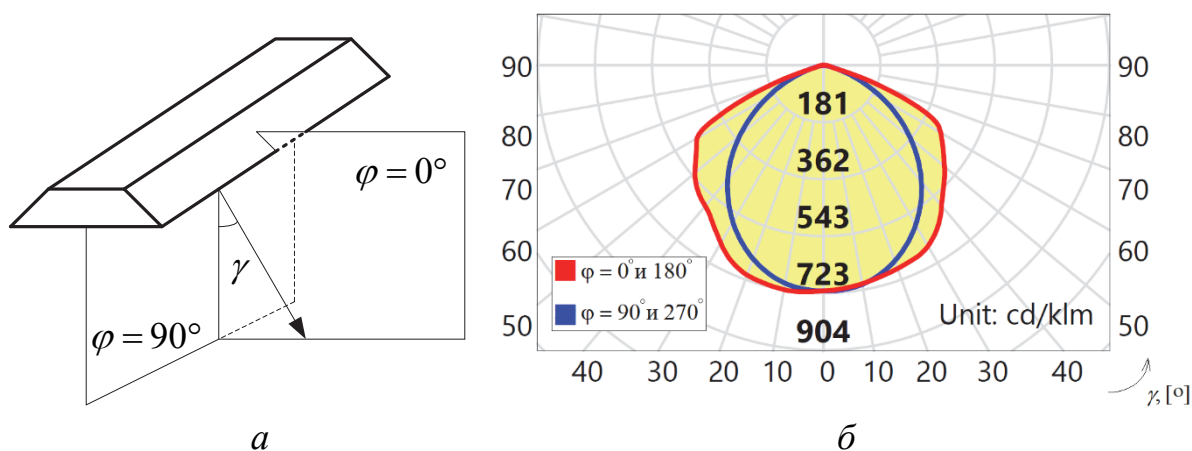
Фиг. 3.7. Светлоразпределителна крива на светлинен източник

Светлоразпределението и в частност светлоразпределителната крива е една от най-важните и основни характеристики на един светлинен източник. За унифициране на графичното и таблично представяне на СРК е прието в техническата литература интензитетът на светлината да се изобразява за условен светлинен поток 1 000 lm [cd/klm].

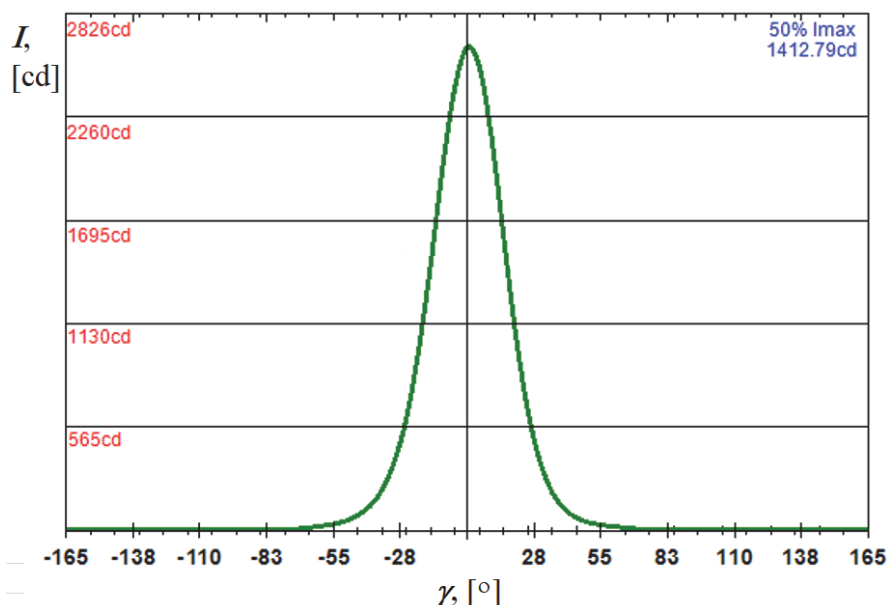
Когато светлинните източници са несиметрични, пресечните криви на фотометричната повърхност с различните меридиални равнини се различават, приемайки различна форма. Светлоразпределението на несиметричните светлинни източници може да се представи чрез построяване на фамилия от светлоразпределителни криви за меридиални равнини, завъртени една спрямо друга на определен ъгъл φ (фиг. 3.8). В този случай посоката на интензитета на светлината се определя от ъглите γ и φ , и е функция на тези ъгли – $I = f(\gamma, \varphi)$ [19,27].

Когато светлинният поток на светлинни източници е концентриран в малък пространствен ъгъл (прожектори, сигнални осветители), светлоразпределителните криви често се представят в Декартова (правоъгълна) координатна система. При тази система ординатната ос съвпада с оптичната ос на светлинния източник и на нея се нанасят стойностите на интензитета

на светлината, а на абсцисната ос се нанася ъгълът между оптичната ос на източника и направлението на интензитета на светлината (фиг. 3.9).



Фиг. 3.8. Светлоразпределение на несиметричен светлинен източник

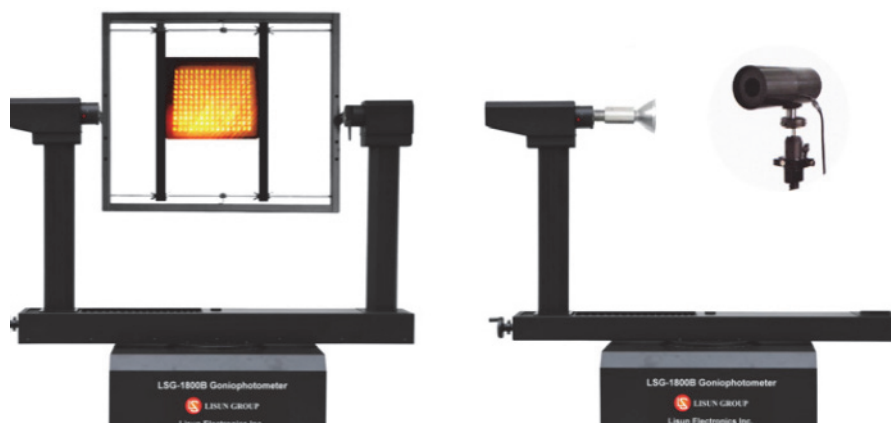


Фиг. 3.9. СРК, представена в правоъгълна координатна система

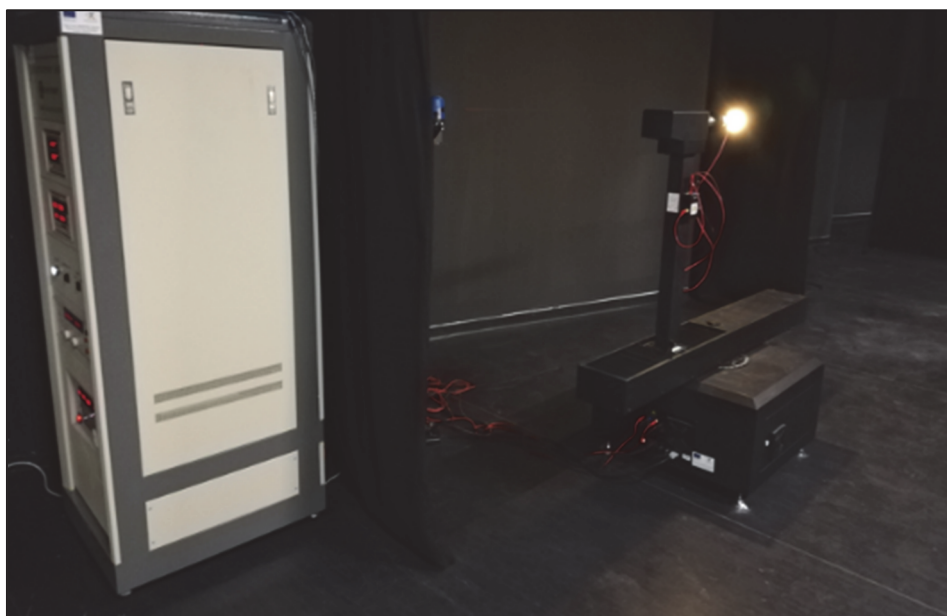
Светлоразпределителната крива може да се представя и в таблична форма чрез стойности на интензитета на светлината за определени ъгли в съответната им меридиална равнина. При проектиране на осветителни уредби с компютърно базирани светлотехнически изчисления е необходимо светлоразпределението да се представи като текстов компютърен файл със специално форматиране, например Eulumdat, IES и др.

Измерванията на СРК се извършват при контролирани условия на работа на светлинния източник (електрически и температурни измервания) и включват фотометрични и ъгови измервания чрез използване на гониофотометър (фиг. 3.2 и 3.10). За такива фотометрични измервания, включ-

ващи посока, е необходимо да се определи пространствената координатната система спрямо светлинния източник.



Фиг. 3.10а. Гониофотометър с монтиран осветител за измерване на СРК



Фиг. 3.10б. Измерване на фотометрични характеристики и ефективност на осветител с гониофотометрична система в лабораторни условия

Гониофотометърът (фиг. 3.10) се състои от механично устройство за закрепване на светлинния източник (осветител или лампата) и фотометрична глава (фотодетектор), заедно със свързаните с тях устройства за задвижване, измерване и обработка на данни. Принципно могат да се разграничат три вида гониофотометри:

- гониофотометър, който върти светлинния източник около две взаимно перпендикулярни оси, чието пресичане е фотометричният център на гониофотометъра. Този тип гониофотометри обикновено се използва с един фотодетектор, разположен на достатъчно разстояние от центъра;
- гониофотометър, който върти светлинния източник само около една ос. Второто завъртане се реализира чрез относително движение между

светлинния източник и фотодетектора около втора ос под прав ъгъл спрямо първата и пресичаща я във фотометричния център на гониофотометъра;

- гониофотометър, в който светлинният източник е неподвижен. Фотодетекторът се върти около две взаимно перпендикулярни оси, чието пресичане е фотометричния център на гониофотометъра [41].

Утвърдените международни светлотехнически стандарти предявяват строги изисквания към измерването на светлоразпределението на светлинни източници [49]. Измерванията с гониофотометър се извършват в „тъмни“ лабораторни помещения при изключено общо осветление и липса на външна светлина, и без отражения от измерваните светлинни източници. Разположението на фотодетектора спрямо гониофотометъра трябва да удовлетворява изискването за разстояние, 5 пъти по-голямо от най-големия линейен размер на светлинния източник, и същевременно да осигурява необходимата точност на фотометричните измервания.

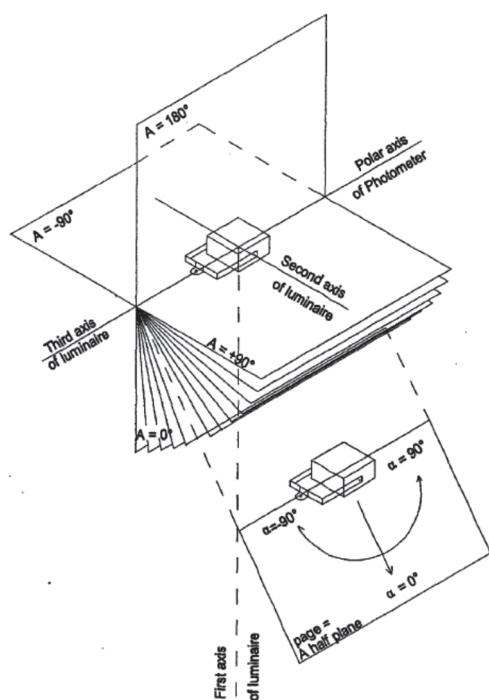
За дефиниране на разпределението на интензитета на светлината на светлинния източник в пространството се използва координатна система за определяне на посоката, в която са направени измерванията. Използва се сферична координатна система с център, съвпадащ с фотометричния център на светлинния източник. Основните фотометрични координатни системи за измерване и представяне на СРК са три – $A-\alpha$, $B-\beta$ и $C-\gamma$ [41,49].

Система $A-\alpha$ е група на равнини, за които линията на пресичане (полярна ос) преминава през фотометричния център и е перпендикулярна на равнината на първата и втората оси на светлинния източник (осветител) – фиг. 3.11а. Системата се свързва неподвижно към светлинния източник и следва наклона му. Първата ос преминава през фотометричния център и е перпендикулярна на светлоизлъчващата повърхност. Тя се намира в $A = 0^\circ$ полуравнина, обикновено в посоката $\alpha = 0^\circ$. Втората ос преминава през фотометричния център на източника и е перпендикулярна на A -равнината. Системата $A-\alpha$ се използва за автомобилно осветление и оптични системи (например предни фарове) и за осветители за вътрешно осветление.

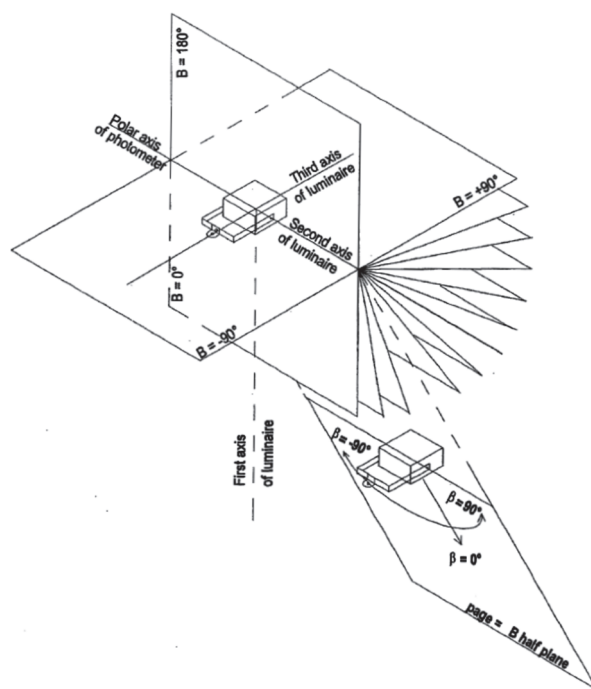
Система $B-\beta$ е група на равнини, за които полярната ос преминава през фотометричния център и е успоредна на втората ос на светлинния източник – фиг. 3.11б. Системата се свързва неподвижно към светлинния източник и следва наклона му. Първата ос преминава през фотометричния център и е перпендикулярна на светлоизлъчващата повърхност. Тя се намира в $B = 0^\circ$ полуравнина, обикновено в посока $\beta = 0^\circ$. Втората ос съвпада с линията на пресичане на B -равнините. Системата $B-\beta$ се използва във фотометрия на прожектори.

Система на $C-\gamma$ е група на равнини, за които полярната ос е вертикална линия през фотометричния център на светлинния източник – фиг. 3.11в. Системата на C -равнини обикновено е ориентирана неподвижно в пространството и не следва наклона на светлинния източник. Линията на пресичане на C -равнините е единственият перпендикуляр на линиите на

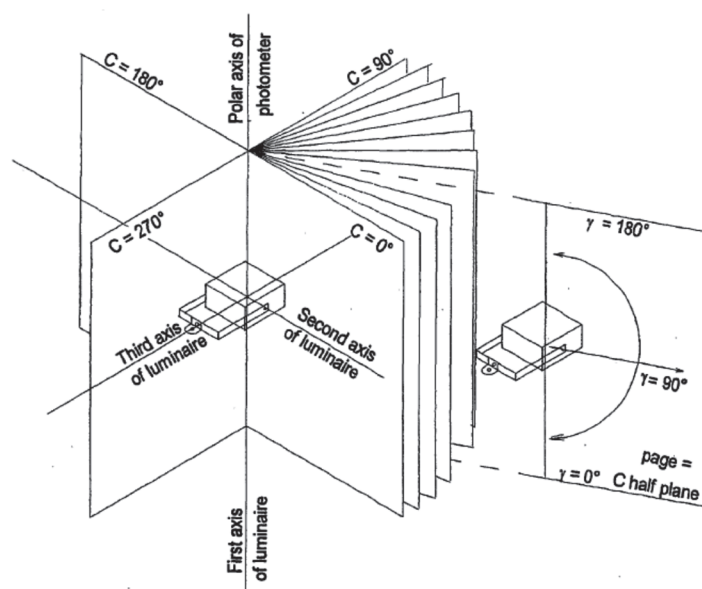
пресичане на A - и B -равнините за ненаклонен светлинен източник. Тя може да не съвпада с първата ос на център и перпендикуляр на светлоизлъчващата повърхност. Втората ос е в рамките на равнина $C = 0^\circ$.



а) A - α система



б) B - β система



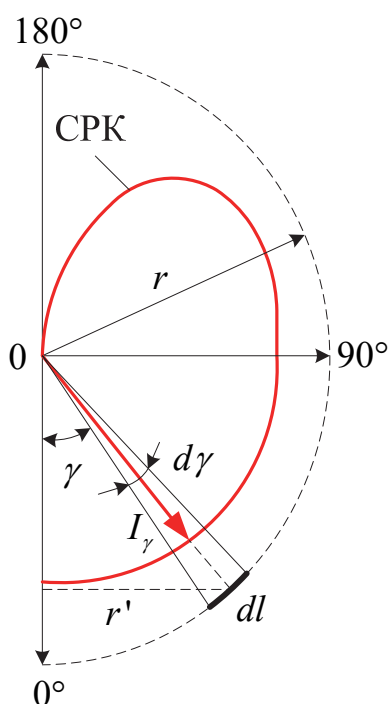
в) C - γ система

Фиг. 3.11. Координатни системи за измерване и представяне на СРК

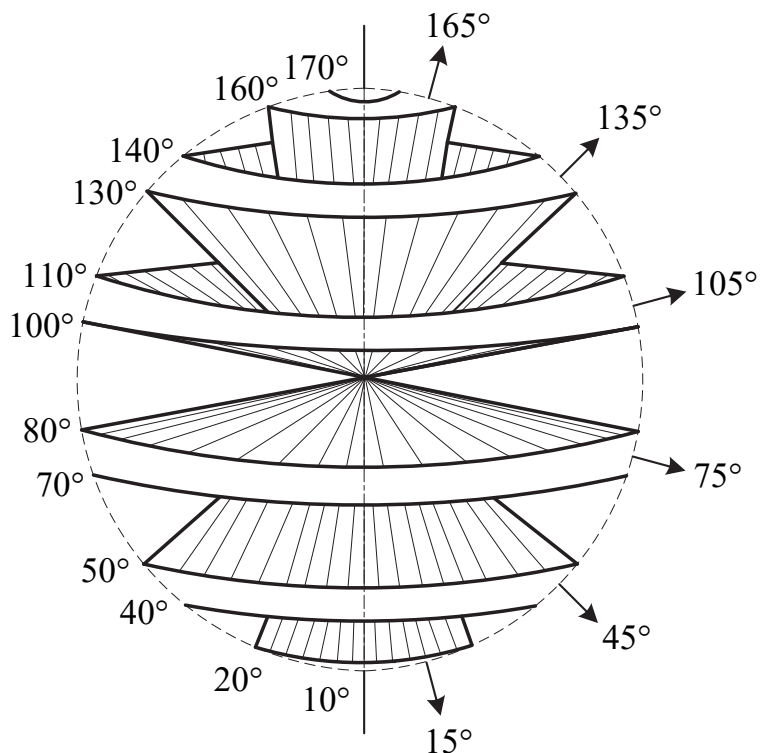
Системата C - γ се използва често при фотометриране на вътрешни и улични осветители и е най-универсално използвана в практиката [41,49].

3.4. Определяне на светлинен поток по зададена светлоразпределителна крива

Светлинният поток на един светлинен източник може да се определи, ако е известна неговата светлоразпределителна крива (примерна СРК е показана на фиг. 3.12). На елементарния равнинен ъгъл $d\gamma$ съответства дъга от окръжността: $dl = r d\gamma$, където r е радиусът на окръжността.



Фиг. 3.12. Изчисляване на светлинен поток по зададена СРК



Фиг. 3.13. Зонални конични пространствени ъгли

Необходимо е да се опише сферична повърхност с център 0 и радиус r за да се определи големината на пространствения ъгъл $d\Omega$. Пространственият ъгъл, под който се вижда тази повърхност от център 0, е равен на отношението на площта на пръстеновидната повърхност, която той отсича от сферата и квадрата на радиуса:

$$d\Omega = \frac{2\pi r \cdot \sin \gamma r d\gamma}{r^2} = 2\pi \sin \gamma d\gamma. \quad (3.9)$$

Интензитетът на светлината I_γ в границите на елементарен равнинен ъгъл $d\gamma$ се приема за постоянен. Излъченият светлинен поток в зоната на пространствения ъгъл $d\Omega$, който се получава при въртенето на $d\gamma$ около вертикалната ос на симетрия, се определя по формулата:

$$d\Phi_\gamma = I_\gamma d\Omega = 2\pi I_\gamma \sin \gamma d\gamma. \quad (3.10)$$

Общият светлинен поток се получава чрез интегриране на израз (3.10) в границите от $\gamma_1 = 0$ до $\gamma_2 = \pi$:

$$\Phi = 2\pi \int_{\gamma_1=0}^{\gamma_2=\pi} I(\gamma) \sin \gamma d\gamma. \quad (3.11)$$

Когато не е известен аналитичният израз $I(\gamma)$, общият светлинен поток Φ може да се определи по метод на зоналните потоци. При този метод пространството около светлинния източник се разделя на конични зони (фиг. 3.12), определени от равнинните ъгли $\gamma_1-\gamma_2, \gamma_2-\gamma_3, \dots, \gamma_n-\gamma_{n+1}$, в границите на които се приема, че светлинният източник излъчва с постоянен интензитет на светлината I_{γ, cp_i} . Светлинният поток в i -тата зона, съгласно израз (3.11), се определя по формулата:

$$\Delta\Phi_i = 2\pi I_{\gamma, cp_i} \int_{\gamma_i}^{\gamma_{i+1}} \sin \gamma d\gamma = 2\pi I_{\gamma, cp_i} (\cos \gamma_i - \cos \gamma_{i+1}), \quad (3.12)$$

$$\Delta\Phi_i = I_{\gamma, cp_i} \Delta\Omega_i, \quad (3.13)$$

където: $I_{\gamma, cp}$ – интензитет на светлината в средата на зоната: $\gamma_{cp_i} = \frac{\gamma_i + \gamma_{i+1}}{2}$;

$\Delta\Omega_i$ – пространствен ъгъл в разглежданата зона: $\Delta\Omega_i = 2\pi (\cos \gamma_i - \cos \gamma_{i+1})$.

Общият светлинен поток се получава като сума от отделните зонални потоци:

$$\Phi = \sum_{i=1}^n \Delta\Phi_i. \quad (3.14)$$

Обикновено пространството около светлинния източник се разделя на 18 равнинни зони ($\Delta\gamma = 10^\circ$) при изчисляването на светлинния поток. За опростяване на изчисленията могат да се използват посочените в табл. 3.2 стойности на пространствения ъгъл за отделните равнинни зони [4,19,27].

Табл. 3.2. Пространствени ъгли при 10-градусни равнинни зони ($\Delta\gamma = 10^\circ$)

Граници на зоната $\gamma_i-\gamma_{i+1}, [^\circ]$	0÷10	10÷20	20÷30	30÷40	40÷50	50÷60	60÷70	70÷80	80÷90
Пространствен ъгъл $\Delta\Omega_i, [^\circ]$	0,095	0,283	0,463	0,628	0,774	0,897	0,993	1,058	1,091
Граници на зоната $\gamma_i-\gamma_{i+1}, [^\circ]$	170÷180	160÷170	150÷160	140÷150	130÷140	120÷130	110÷120	100÷110	90÷100

При несиметрични светлинни източници интензитетът на светлината I_γ за дадена посока γ се определя като средна аритметична от отделните стойности от СРК за различни ъгли φ (фиг. 3.8):

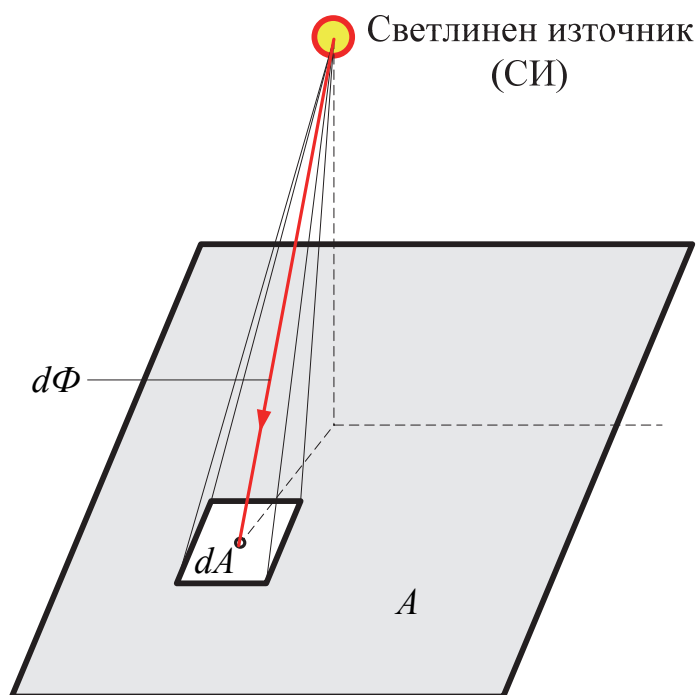
$$I_\gamma = \frac{I_{\gamma, \varphi_1} + I_{\gamma, \varphi_2} + \dots + I_{\gamma, \varphi_n}}{n}, \quad (3.15)$$

където n – брой на фамилията криви, с които е определено светлоразпределението на светлинния източник [19,27].

4. ОСВЕТЕНОСТ. КОСИНУСОВ ЗАКОН И ЗАКОН ЗА КВАДРАТИЧНОТО ОТДАЛЕЧЕНИЕ. ЯРКОСТ

4.1. Осветеност

За количествена оценка на степента на осветяване на повърхности се въвежда фотометричната величина *осветеност* E . Тя представлява плътността на разпределението на падналия от светлинния източник върху дадена повърхност светлинен поток (фиг. 4.1).



Фиг. 4.1. Графична постановка към определяне на осветеност

Определя се с отношението на светлинния поток $d\Phi$ и площта dA , върху която той попада:

$$E = \frac{d\Phi}{dA}. \quad (4.1)$$

За повърхност с крайни размери се използва средната осветеност на повърхността:

$$E_{cp} = \frac{\Phi}{A}. \quad (4.2)$$

Осветеността се измерва с единицата лукс [lx], като 1 lx се получава, когато върху повърхност с площ 1 m² попадне светлинен поток 1 lm.



Фиг. 4.2. Луксметър

Измерването на осветеността се извършва с луксметър (фиг. 4.2). Фотоелементът е основният компонент на луксметъра, който генерира електрически ток, пропорционален на нивото на осветяване на неговата повърхност. Токът се измерва с помощта на аналогов или цифров милиамперметър, калибриран да показва луксове. За коректно измерване на осветеността е важно фотоелементът да бъде със спектрална ефективност равна или близка до тази на човешкото око $V(\lambda)$ [41,73].

Коефициентът на *обща равномерност на осветеността* U_o характеризира разпределението на осветеността върху дадена осветявана повърхност. Общата равномерност на осветеността се определя с отношението:

$$U_o = \frac{E_{min}}{E_{cp}}, \quad (4.3)$$

където E_{min} и E_{cp} са съответно минималната и средната осветеност върху разглежданата повърхност.

Осветеността е основен количествен показател при нормиране на вътрешното осветление, като стойностите ѝ са посочени в БДС EN 12464-1 в зависимост от функционалното предназначение на помещението.

Общата равномерност на осветеността U_o в работното пространство не трябва да бъде по-малка от стойностите на минималната равномерност, дадени в БДС EN 12464-1. За изкуствено осветление равномерността на осветеността в непосредствената околна повърхност трябва да бъде $U_o > 0,40$; върху зоната на фона трябва да бъде $U_o > 0,10$.

Освен осветеност, при оптичните свойства на телата се проявяват светлинна експозиция и светимост [27].

Светлинната експозиция H се дефинира като количеството светлинна енергия Q , падаща върху единица площ от осветявана повърхност за определено време. Определя се със следния израз:

$$H = \frac{dQ}{dA}. \quad (4.4)$$

Единицата за измерване на светлинна експозиция е [lx.s]. Светлинната експозиция вече не се използва.

Светимост M се нарича плътността на излъчения (ако е част от светлинен източник) или отразения от дадена повърхност светлинен поток. Тя е равна на отношението на излъчения от повърхността светлинен поток $d\Phi$ към нейната площ dA :

$$M = \frac{d\Phi}{dA}. \quad (4.5)$$

За повърхности с крайни размери се използва средната светимост на повърхността:

$$M_{cp} = \frac{\Phi}{A}. \quad (4.6)$$

Единицата за измерване на светимост е [lm/m²].

4.2. Косинусов закон и закон за квадратичното отдалечение

За дефиниране на косинусовия закон се разглежда постановката на фиг. 4.3. В осветителната техника често се среща задачата за определяне на осветеността, която създава точковиден светлинен източник (СИ) със зададена светлоразпределителна крива в определена точка M от дадена повърхност A . Във фотометрията е основание един СИ да бъде приет с известно приближение за точковиден, ако неговият максимален линеен размер d_{max} е 5 пъти по-малък от разстоянието l до осветяваната повърхност ($l > 5d_{max}$) [19,27,41,83].

В графичната постановка към извеждането на косинусовия закон известни се явяват разстоянието l между светлинния източник, разположен в точка O , и точката M , ъгълът β между нормалата n към повърхността A в точката M и правата OM , свързваща тази точка със светлинния източник. Правата OM съвпада с посоката на интензитета на светлината I_γ , който сключва ъгъл γ спрямо оста на симетрия на светлинния източник.

Пространственият ъгъл, под който площовият елемент dA се вижда от точката O , в центъра на който е разположена точката M , е:

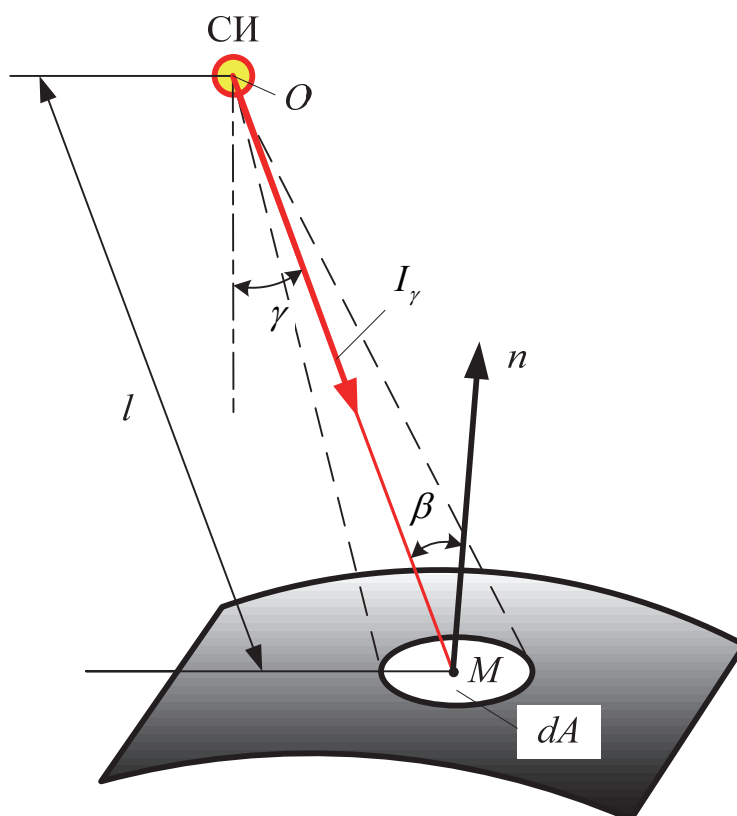
$$d\Omega = \frac{dA \cos \beta}{l^2}. \quad (4.7)$$

Светлинният поток, който пада върху площовия елемент dA от разглежданата повърхност, е:

$$d\Phi = I_{\gamma} d\Omega = \frac{I_{\gamma} dA \cos \beta}{l^2}. \quad (4.8)$$

Осветеността в точка M от площовия елемент dA на разглежданата повърхност, съгласно уравнения (4.1) и (4.8), е:

$$E = \frac{d\Phi}{dA} = \frac{I_{\gamma} \cos \beta}{l^2}. \quad (4.9)$$



Фиг. 4.3. Графична постановка към извеждане на закона за квадратичното отдалечение и косинусовия закон

Получената зависимост в уравнение (4.9) между осветеността E в точка M и интензитета на светлината I_{γ} в посока на точката M , разстоянието l между нормалата n към повърхността A в точка M и точка O , в която е разположен точковидният светлинен източник, представлява комбинация от закона за квадратичното отдалечение, поради обратно пропорционалната зависимост от l^2 , и косинусовия закон, поради косинусовата зависимост от ъгъла β .

Ако посоката на интензитета на светлината I_{γ} е перпендикулярна на повърхността в точка M (фиг. 4.3), то ъгъл $\beta = 0^\circ$ и $\cos \beta = 1$, от където следва, че осветеността ще бъде максимална:

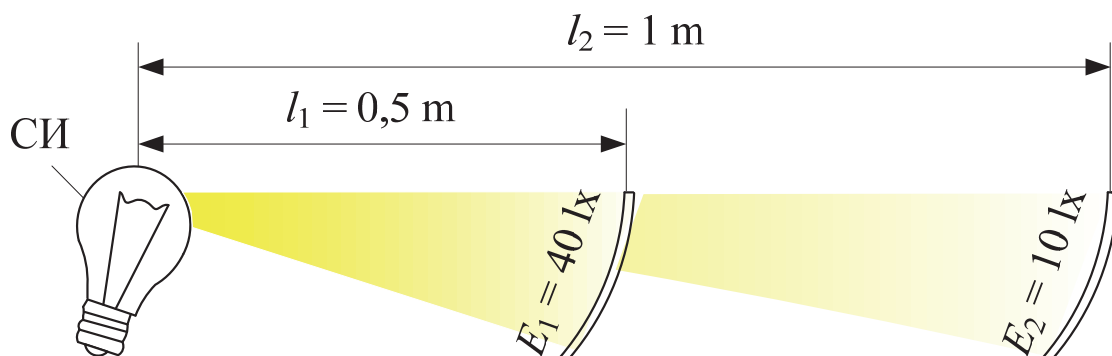
$$E = \frac{I_{\gamma}}{l^2}. \quad (4.10)$$

От закона за квадратичното отдалечение и косинусовия закон могат да се направят следните важни за ефективността на осветителните уредби изводи при разположението и ориентацията на светлинните източници спрямо осветяваните повърхности:

- осветеността е право пропорционална на интензитета на светлината на светлинния източник в дадената посока и обратнопропорционална на квадрата на разстоянието от него до осветяваната точка;
- осветеността е пропорционална на косинуса на ъгъла на падане на светлината.

На фиг. 4.4 е показан пример за квадратичното намаляване на осветеността E спрямо разстоянието l . Един светлинен източник (СИ) осветява две повърхности с интензитет на светлината $I = 10 \text{ cd}$; повърхностите са разположени перпендикулярно спрямо посоката на разпространение на светлината. От закона за квадратичното отдалечение за двете повърхности е известно, че: $E_1 l_1^2 = E_2 l_2^2$; $E_2 = \left(\frac{l_1}{l_2}\right)^2 E_1$.

Първата повърхност се намира на разстояние $l_1 = 0,5 \text{ m}$ от светлинния източник и е с осветеност $E_1 = 40 \text{ lx}$, а втората повърхност се намира на 2 пъти по-голямо разстояние $l_2 = 1 \text{ m}$ от светлинния източник и осветеността ѝ намалява 4 пъти – до $E_2 = 10 \text{ lx}$.

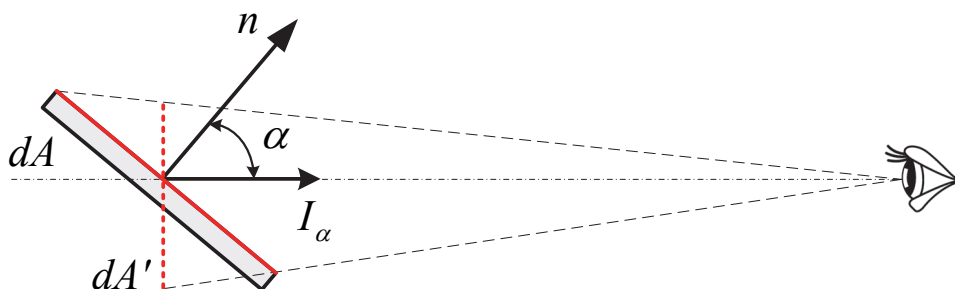


Фиг. 4.4. Закон за квадратичното отдалечение при различно разстояние на осветяваните повърхности спрямо светлинния източник

Косинусовият закон и законът за квадратичното отдалечение са фундаментални при светлотехническите измервания и изчисления. Тези закони могат да се използва в случаите, когато светлинният източник се доближава до точковидния, т.е. $l > 5d_{max}$, при което се счита, че законите са достатъчно точни (точност от 1 %) [41,73,83,87]. Правилото $l > 5d_{max}$ не е приложимо при светлинни източници със силно насочено излъчване [87].

4.3. Яркост

Яркостта може да се определи както за светеща, така и за отразяваща повърхност. За дефиниране на яркостта се разглежда фиг. 4.5.



Фиг. 4.5. Графична постановка за определяне на яркост на светеща повърхност

Яркостта на светещ повърхностен елемент dA за дадена посока се определя като отношение на светлината в тази посока към проекцията dA' на dA в равнина, която е перпендикулярна на същата посока:

$$L_\alpha = \frac{dI_\alpha}{dA \cos \alpha} = \frac{dI_\alpha}{dA'} \quad (4.11)$$

След заместване на интензитета на светлината dI_α от израз (3.7), за яркостта се получава:

$$L_\alpha = \frac{d\Phi_\alpha}{d\Omega dA \cos \alpha} = \frac{d\Phi_\alpha}{d\Omega dA'}, \quad (4.12)$$

т.е. яркостта е пространствената плътност на светлинния поток, отнесена към площта на проекцията на светещата повърхност в равнина, перпендикулярна на зададената посока [19].

Яркостта се измерва в $[\text{cd}/\text{m}^2]$, като е $1 \text{ cd}/\text{m}^2$, когато интензитетът на светлината е 1 cd , а площта на проекцията в равнина, перпендикулярна на зададената посока, е 1 m^2 . Измерването на яркостта се извършва с яркомер (фиг. 4.6). Принципът на работа на яркомера се основава на две оптични системи – система за насочване и система за измерване. Системата за насочване е ориентирана по такъв начин, че изображението да съвпада с точката за измерване. След като се ориентира в подходяща посока, светлината, която достига до него, се трансформира в електрически ток, чиито стойности са пропорционални на яркостта $[\text{cd}/\text{m}^2]$ [73].



Фиг. 4.6. Яркомер

След интегриране на израз (4.11) за яркостта на повърхностен елемент A' по цялата площ $\Sigma A'$ на проекцията на излъчващото тяло в равнина, перпендикулярна на зададената посока, се получава:

$$L_{\alpha} = \frac{\int_{A'} I_{\alpha}}{A'} = \frac{I_{\alpha}}{A'}, \quad (4.13)$$

където: I_{α} – резултантен интензитет на светлината в зададената посока; α – ъгъл между нормалата n на светещата повърхност и посоката на I_{α} .

Получената с израз (4.13) яркост за повърхност с крайни размери се нарича *габаритната яркост* на светещата повърхност (светлинния източник) [19].

Ако са известни яркостите L_i на съставните елементарни площи dA_i на светещата повърхност, *средната яркост* L_{cp} на цялата светеща повърхност се определя с израз:

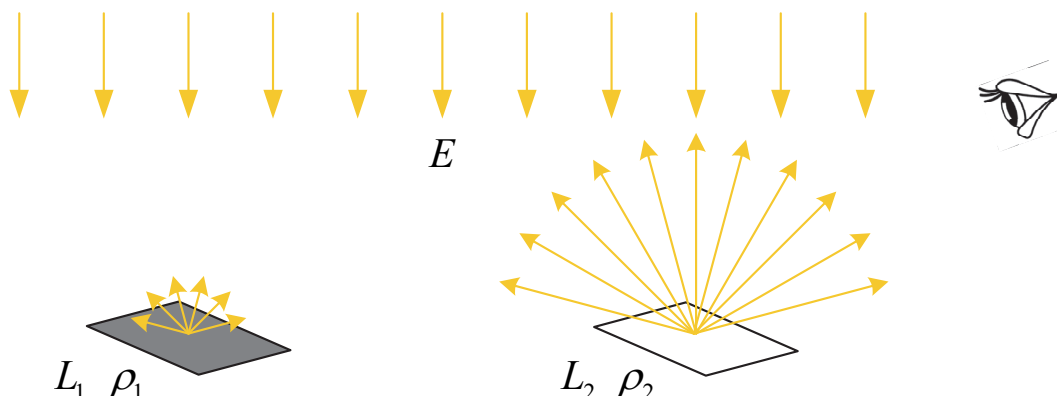
$$L_{cp} = \frac{\int_{\Omega} L_i d\Omega}{\int_{\Omega} d\Omega}, \quad (4.14)$$

където: Ω – пространствен ъгъл, под който се вижда цялата светеща повърхност; $d\Omega_i$ – елементарен пространствен ъгъл, под който се вижда елементарната площ dA_i .

Яркостта на една дифузно отразяваща повърхност е пропорционална на осветеността E и на коефициента на дифузно отражение ρ на същата повърхност:

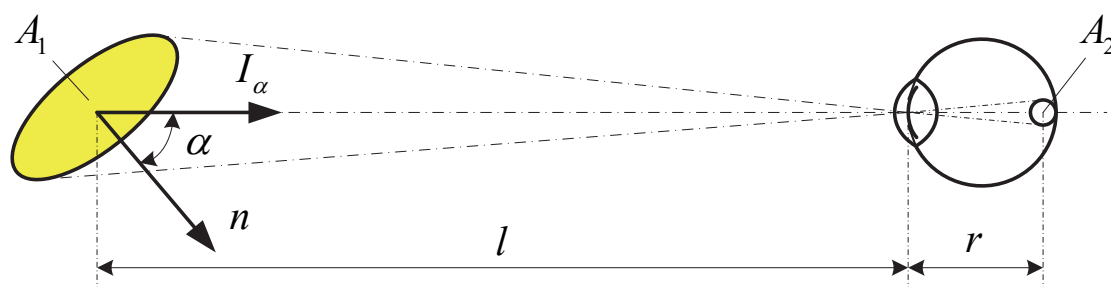
$$L = \frac{\rho}{\pi} E. \quad (4.15)$$

На фиг. 4.7 са показани две повърхности – тъмна (с яркост L_1 и коефициент на отражение ρ_1) и светла (с яркост L_2 и коефициент на отражение ρ_2), които имат еднаква осветеност E . С по-голяма яркост от човешкото око се възприема светлата повърхност ($L_2 > L_1$), тъй като тя има по-голям коефициент на отражение ($\rho_2 > \rho_1$).



Фиг. 4.7. Повърхности, възприемани с различна яркост при еднаква осветеност

Яркостта е светлотехническият параметър, на който е право пропорционална осветеността на ретината и съответно количественото възприятие за светлина на човешкото око. Интензивността на зрителното усещане се определя от плътността на падналия върху ретината светлинен поток (осветеност), което се установява от фиг. 4.8 [19,27,97].



Фиг. 4.8. Непосредствено възприемане на яркостта от човешкото око

Светещата повърхност A_1 от фиг. 4.8 има крайни размери. Нейното изображение върху ретината на човешкото око е A_2 . От законите на геометричната оптика е известно, че:

$$\frac{A_1 \cos \alpha}{l^2} = \frac{A_2}{r^2}. \quad (4.16)$$

Осветеността върху ретината в зоната на изображението се определя с изрази:

$$E_p = \frac{\Phi}{A_2}, \quad (4.17)$$

където Φ е светлинният поток, попадащ в площ A_2 от ретината на окото.

Светлинният поток от израз (4.17) може да се определи от осветеността на зеницата E_z , създавана от светещата площ A_1 , отвора на зеницата q_z и коефициента на пропускане на светлина τ_z на очната зеница:

$$\Phi = E_z q_z \tau_z = \frac{I_\alpha}{l^2} q_z \tau_z. \quad (4.18)$$

След заместване на светлинния поток с равенството от (4.18) в уравнението за осветеността на ретината се получава:

$$E_p = \frac{q_z \tau_z}{r^2} \frac{I_\alpha}{A_1 \cos \alpha} = k L_\alpha, \quad (4.19)$$

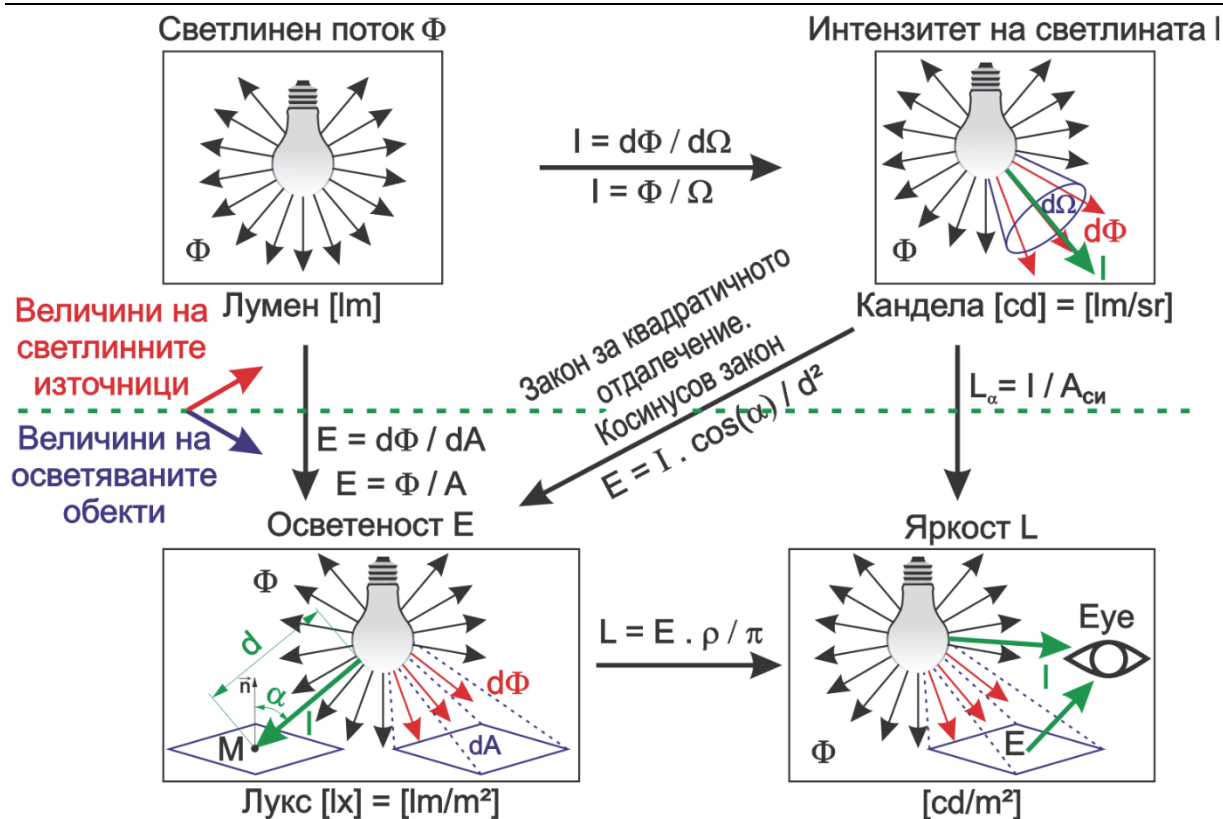
където $k = \frac{q_z \tau_z}{r^2}$ е константа при постоянен отвор ($q = \text{const}$) на зеницата.

С уравнение (4.19) се доказва, че осветеността E_p на ретината в човешкото око е пропорционална на яркостта на наблюдавания обект L_α .

Нормирането на осветлението на работните места на закрито се извършва по осветеност, но много важно значение има добре балансираното разпределение на яркостта, тъй като тя влияе върху ефективността на зрителните функции, зрителния комфорт, степента на умора, заслепяването и работоспособността. За да се осигури подходящо разпределение на яркостта, проектантите на вътрешни осветителни уредби трябва да отчитат и избират подходящи стойности на отражението и осветеността на отделните повърхности в помещенията [8,41].

Основен количествен показател при нормиране и проектиране на улични осветителни уредби е яркостта на осветяваните обекти [12].

Обобщено представяне на обозначенията, дефинициите и мерните единици на основните светлотехнически величини и техните зависимости са показани на фиг. 4.9.



където:

Ω - пространствен ъгъл, в който се излъчва Φ

A - площ

$A_{\text{си}}$ - видима площ от светлинния източник

d - разстояние между светлинния източник и точка M

ρ - дифузен отражателен коефициент на повърхнината

$\pi = 3.14$

Фиг. 4.9. Основни светлотехнически величини и зависимости

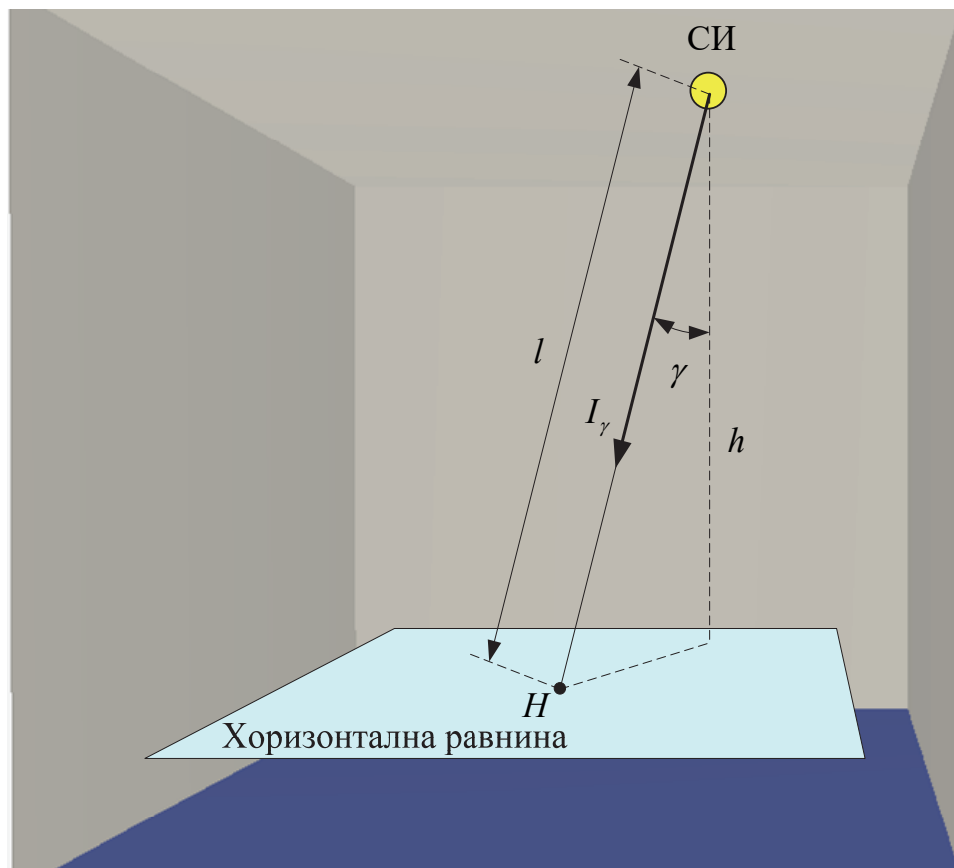
5. ХОРИЗОНТАЛНА, ВЕРТИКАЛНА, ПРОСТРАНСТВЕНА, СРЕДНА СФЕРИЧНА, СРЕДНА ПОЛУСФЕРИЧНА, СРЕДНА ЦИЛИНДРИЧНА И СРЕДНА ПОЛУЦИЛИНДРИЧНА ОСВЕТЕНОСТ

Осветеността е основен количествен показател при нормиране на вътрешното осветление. Нормативните стойности на осветеността за конкретен тип помещение и зрителна задача или дейност са посочени в БДС EN 12464-1:2021 [8]. Посочените в нормативните документи стойности на осветеността се отнасят както за работна повърхност, непосредствена околна повърхност и зона на фона, така и за оценка на наситеността на пространството със светлина. Работната повърхност, непосредствената околна повърхност и зона на фона могат да бъдат хоризонтални, вертикални или

наклонени. Всяка от тези равнини има съответно хоризонтална, вертикална или наклонена осветеност [19,73].

5.1. Хоризонтална и вертикална осветеност

Хоризонталната осветеност E_h [lx] е осветеността върху хоризонтална равнина, осветявана от светлинен източник (фиг. 5.1).



Фиг. 5.1. Определяне на хоризонтална осветеност

Хоризонталната осветеност може да се определи от косинусовия закон. Като се вземат предвид дадените на фиг. 5.1 означения и съгласно косинусовия закон, за хоризонталната осветеност в точката H се получава:

$$E_h = \frac{I_\gamma \cos \gamma}{l^2}. \quad (5.1)$$

Като се отчете връзката между точката H , местоположението на светлинния източник спрямо точката H , разстоянието l и височината h :

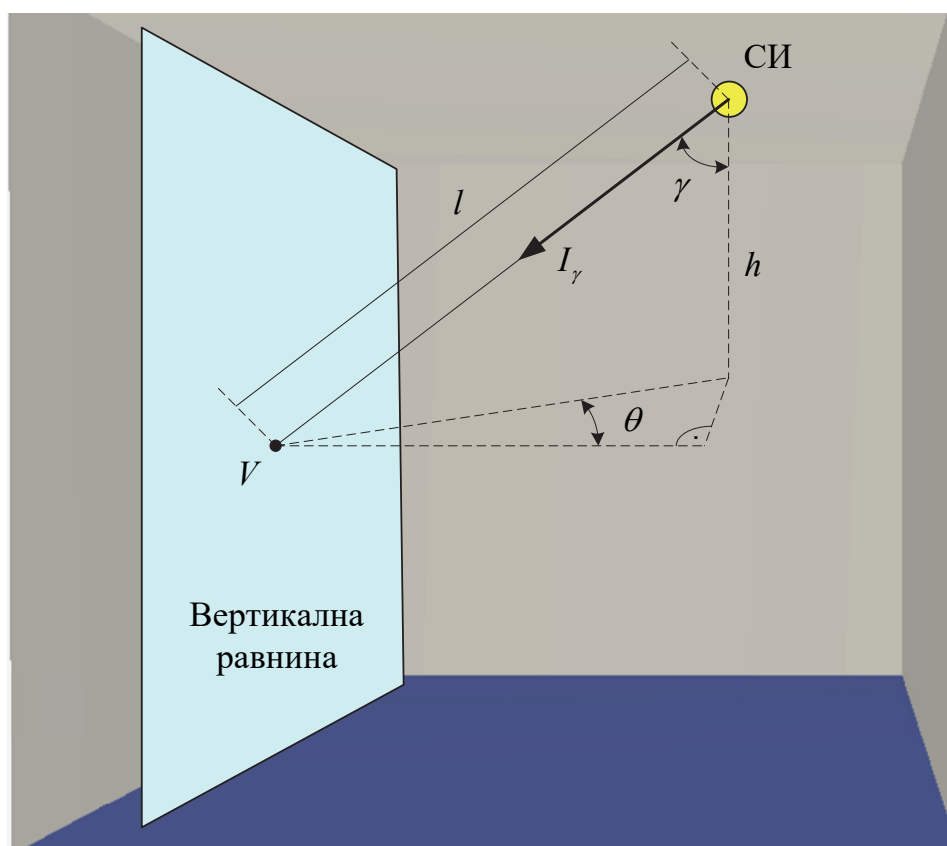
$$l = \frac{h}{\cos \gamma},$$

уравнение (5.1) може да се преобразува в следния вид:

$$E_h = \frac{I_\gamma \cos^3 \gamma}{h^2}. \quad (5.2)$$

Работното пространство за преобладаващата част от зрителните задачи е хоризонтално (четене, писане, зони за движение и др.) [8,12].

Вертикалната осветеност E_v [lx] е осветеността, която се получава върху вертикална равнина, осветявана от светлинен източник (фиг. 5.2).



Фиг. 5.2. Постановка за определяне на вертикална осветеност

Вертикалната осветеност също може да се определи директно от косинусовия закон. Като се вземат предвид дадените на фиг. 5.2 означения и при ъгъл $\theta = 0^\circ$, за вертикалната осветеност в точката V се получава:

$$E_v = \frac{I_\gamma \sin \gamma}{l^2}. \quad (5.3)$$

Като се отчете връзката между точката V , местоположението на светлинния източник спрямо точката V , разстоянието l и височината h , уравнение (5.3) може да се преобразува във вида:

$$E_v = \frac{I_\gamma \cos^2 \gamma \sin \gamma}{h^2}. \quad (5.4)$$

Ако вертикалната равнина се завърти под ъгъл θ ($\theta > 0^\circ$), както е показано на фиг. 5.2, за вертикалната осветеност се получава:

$$E_v = \frac{I_\gamma \cos^2 \gamma \sin \gamma \cos \theta}{h^2}. \quad (5.5)$$

От уравнение (5.5) и фиг. 5.2 се вижда, че при $\theta = 90^\circ \Rightarrow \cos 90^\circ = 0$, за вертикалната осветеност се получава $E_v = 0$ lx.

При проектиране на вътрешни осветителни уредби трябва да се постигне необходимото ниво на осветеност. За да бъде възможно светлината да разкрива в достатъчна степен текстурите и триизмерните форми на обектите в едно помещение и да се създават подходящи контрасти, трябва съотношението между вертикалната E_v и хоризонталната E_h осветеност в посоката на наблюдение да бъде [73]:

$$\frac{E_v}{E_h} \geq 0,25.$$

Осветеността върху работната повърхност, непосредствената околна повърхност и зоната на фона се измерва и изчислява в система от мрежи от точки [8,12,40,41,66]. Предпочитат се мрежи с почти квадратни клетки, като отношението на дължината към широчината им трябва да е между 0,5 и 2. Максималният размер на клетката на мрежата p се определя по формулата:

$$p = 0,2 \times 5^{\log_{10}(d)}, \quad (5.6)$$

където d е по-дългият размер на изчисляваната площ [m], ако отношението на по-дългата към по-късата страна е 2 или повече; в обратния случай d е по-късият размер на площта.

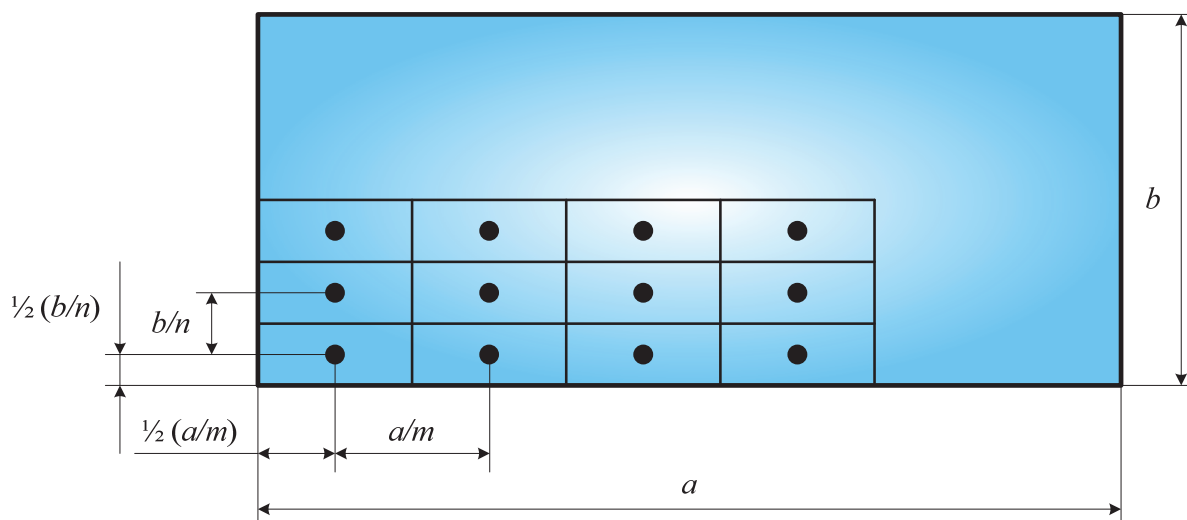
Максималният размер на клетката на мрежата за осветявани повърхнини на закрито трябва да бъде $p \leq 10$ m. Броят на точките в съответния размер е даден чрез най-близкото цяло число на d/p . Формула (5.6) е получена при предположение, че p е пропорционално на $\log(d)$, където:

- $p = 0,2$ m за $d = 1$ m;
- $p = 1$ m за $d = 10$ m;
- $p = 5$ m за $d = 100$ m.

Типична решетка е показана на фиг. 5.3, в която стойностите на осветеността се изчисляват и измерват в централната точка на правоъгълните клетки на мрежата. Дългата страна на измервателната зона е означена с a , късата – с b . Броят на измервателните (контролни) точки по направление на дългата страна е m , а по направление на късата страна – n . Броят на редовете в измервателната решетка се изменя в интервала ($i = 1 \dots n$); броят на колоните се изменя в интервала ($j = 1 \dots m$).

Средната осветеност E_{cp} в измервателната зона (работна повърхност, непосредствена околна повърхност и зона на фона) се получава като средноаритметична стойност от измерените в контролните точки осветености:

$$E_{cp} = \frac{1}{n} \frac{1}{m} \sum_{i=1; j=1}^{n; m} E_{ij}. \quad (5.7)$$



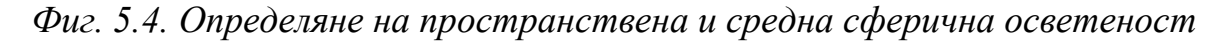
Фиг. 5.3. Решетка с правоъгълни клетки и точки за контрол на осветеността

Вертикалната осветеност се използва при оценяване на осветеността на вертикални повърхности, например на стени, фасади на сгради, при разпознаване на лица и др. В стандарта за улично осветление се нормира минималната стойност на вертикалната осветеност E_v за светлотехнически класове Р и EV – пешеходни зони, зони за велосипедисти и аварийни ленти до пътните платна [12].

В осветителната техника не е приемливо количествената оценка на осветлението в определена точка да се извършва с много стойности на дадена величина. Като пространствени характеристики на осветлението се предпочитат да се използват интегрални и векторни светлинни величини, които се дефинират като производни на основните светлинни величини [10,19]. Разглеждат се пространствена, средна сферична, средна полусферична, средна цилиндрична и средна полуцилиндрична осветеност.

5.2. Пространствена, средна сферична и средна полусферична осветеност

Пространствената осветеност и средната сферична осветеност могат да се определят като се използва фиг. 5.4 и нейните означения.



(5.8)

(5.9)

където L е яркостта на светлинния източник, разположен в пространството, ограничено от пространствения ъгъл $d\Omega$.

Чрез ъглите φ и θ от фиг. 5.4 се определя оста на елементарния пространствен ъгъл:

$$d\Omega = \sin \theta d\varphi d\theta. \quad (5.10)$$

Съгласно уравнение (5.9) и използваните във фиг. 5.4 означения, изразът (5.8) за пространствената осветеност се преобразува във вида:

$$E_{\Omega} = \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} L_{\varphi,\theta} \sin \theta d\varphi d\theta. \quad (5.11)$$

Средната сферична осветеност E_o [lx] се определя като средна плътност на светлинния поток на повърхността на сфера с безкрайно малък радиус r с център, който съвпада с разглежданата точка (точка M от фиг. 5.4) [1,10,19].

Излъченият светлинен поток $d\Phi$ от разположения в зоната на пространствения ъгъл $d\Omega$ елементарен светлинен източник, който пада върху повърхността на сферата, се определя с израза:

$$d\Phi = dE_n \pi r^2 = \pi r^2 L_{\varphi,\theta} d\Omega. \quad (5.12)$$

Средната сферична осветеност, която създава елементарният светлинен източник, е равна на отношението на светлинния поток $d\Phi$ към повърхността на сферата A_o :

$$dE_o = \lim_{A_o} \frac{d\Phi}{A_o} = \lim_{4\pi r^2} \frac{d\Phi}{4\pi r^2} = \frac{L_{\varphi,\theta} d\Omega}{4} = \frac{dE_n}{4}. \quad (5.13)$$

Средната сферична осветеност, която се създава от всички светлинни източници, се определя чрез интегриране на израз (5.13) в областта на цялото пространство около разглежданата точка:

$$E_o = \int_{4\pi} dE_o = \frac{1}{4} \int_{4\pi} dE_n = \frac{1}{4} \int_{4\pi} L_{\varphi,\theta} d\Omega. \quad (5.14)$$

След заместване на пространствения ъгъл $d\Omega$, съгласно равенство (5.10), за средната сферична осветеност E_o се получава:

$$E_o = \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} dE_o = \frac{1}{4} \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} L_{\varphi,\theta} \sin \theta d\varphi d\theta. \quad (5.15)$$

От получените изрази (5.11) и (5.15) съответно за пространствената E_{Ω} и средната сферична E_o осветеност, се вижда, че те се различават само със стойност $\frac{1}{4}$, т.е. може да се запише, че [2]:

$$E_o = \frac{1}{4} E_{\Omega}. \quad (5.16)$$

Средната полусферична осветеност E_{hs} [lx] се определя като средна плътност на светлинния поток върху повърхността на полусфера с безкрайно малък диаметър, чийто център съвпада с разглежданата точка M (фиг. 5.5) [2,10,19].

Ако точката се осветява само от един елементарен светлинен източник, светлинният поток, който пада върху повърхността на полусферата, разположена върху равнината, в която лежи точка M , се определя с израза:

$$d\Phi = dE_n A'_{hs} d\Omega, \quad (5.17)$$

където A'_{hs} е проекцията на повърхността на сферата в равнина, която е перпендикулярна на посоката на разпространение на светлинния поток.

Като се имат предвид означенията на фиг. 5.5, за проекцията на повърхността A'_{hs} може да се запише:

$$A'_{hs} = \frac{\pi r^2}{2} (1 + \cos \theta). \quad (5.17)$$

За светлинния поток се получава:

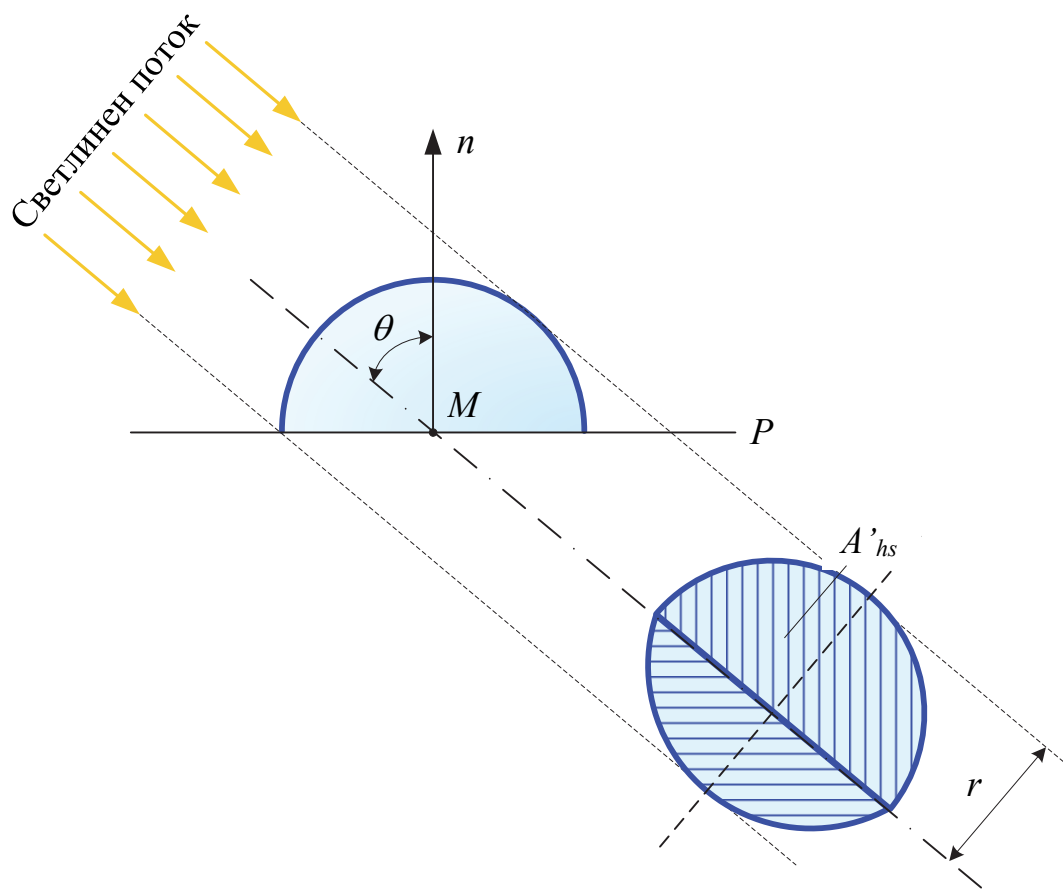
$$d\Phi = dE_n \frac{\pi r^2}{2} (1 + \cos \theta) = L_{\theta} \frac{\pi r^2}{2} (1 + \cos \theta) d\Omega. \quad (5.18)$$

Средната полусферична осветеност се определя с израза:

$$E_{hs} = \frac{d\Phi}{A_{hs}} = \frac{dE_n}{4} (1 + \cos \theta) = \frac{L_{\theta}}{4} (1 + \cos \theta) d\Omega. \quad (5.19)$$

След интегриране на израз (5.19), за средната полусферична осветеност се получава:

$$E_{hs} = \frac{1}{4} \int_{4\pi} L_{\varphi,\theta} (1 + \cos \theta) d\Omega = E_o + \frac{1}{4} \int_{4\pi} L_{\varphi,\theta} \cos \theta d\Omega. \quad (5.20)$$



Фиг. 5.5. Определяне на средна полусферична осветеност

Когато светлинните източници са разположени над равнината P :

$$E_{hs} = E_o + \frac{1}{4} E, \quad (5.21)$$

където E е осветеността в точка M , лежаща в равнината P , тъй като:

$$E = \int_{2\pi} L_{\varphi, \theta} \cos \theta d\Omega. \quad (5.22)$$

Ако светлинните източници са разположени от двете страни на равнината P , тогава за средната полусферична осветеност може да се запише:

$$E_{hs} = E_o + \frac{E' - E''}{4} = E_o \pm \frac{E_{\Omega}}{4}, \quad (5.23)$$

където: E' и E'' – осветености в точка M съответно откъм страната на полу-сферата и на противоположната страна на равнината; E_{Ω} – пространст-

вена осветеност, която е със знак „+“ при $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$ и знак „-“ при $\frac{\pi}{2} < \theta \leq \pi$ [2,21].

В осветителната техника пространствената и средната сферична осветеност намират приложение при оценяване на осветлението на обемни обекти със сложна форма, например при осветяване на големи машини и съоръжения със сложни релефни форми (мелници, парни котли, генераторни групи, циркулационни помпи, вентилатори), облъчване на растения и животни. Средната полусферична осветеност E_{hs} се използва за оценяване на осветеността на пешеходни зони, зони за велосипедисти, аварийни ленти в близост до пътното платно. В стандарта за улично осветление средната полусферична осветеност се нормира за светлотехнически клас HS – зони за движение на пешеходци и велосипедисти [12]. Средната полусферична осветеност също така се препоръчва и за оценяване на осветлението на обемни обекти, разположени върху равнинни повърхности, например осветление на скулптурни елементи, работни места за монтаж на уреди, металообработващи и дървообработващи стругове, тъкачни станове и др. [10,19].

5.3. Средна цилиндрична и средна полуцилиндрична осветеност

За количествена оценка на наситеността на пространството със светлина се въвежда величината *средна цилиндрична осветеност* E_z [lx]. Разглежда се фиг. 5.6 при определянето на средната цилиндрична осветеност. Цилиндърът е с вертикална ос на симетрия. За произволна точка от пространството (точка M) тя е равна на средната осветеност на страничната повърхност на цилиндър с безкрайно малки размери, разположен симетрично около разглежданата точка с вертикално ориентирана ос [2,19,21].

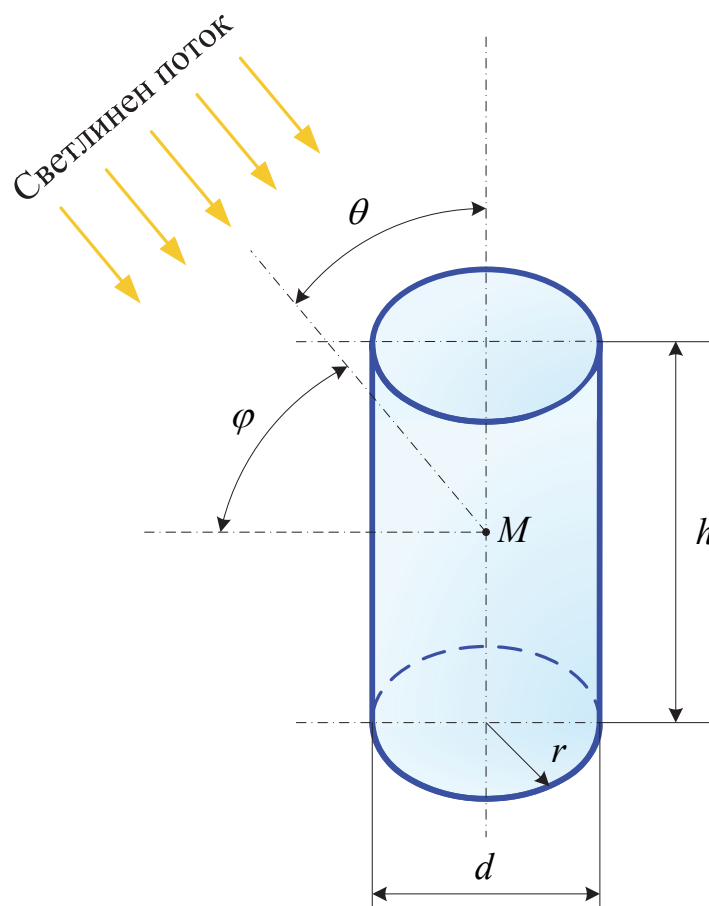
Елементарен светлинен източник излъчва светлинен поток $d\Phi$, който пада върху страничната повърхност на цилиндъра. Светлинният поток се определя с израза:

$$d\Phi = dE_n dh \sin \theta = L_\theta dh \sin \theta d\Omega, \quad (5.24)$$

където: dE_n – нормална осветеност в разглежданата точка; L_θ – яркост на светлинния източник в посока, определена с ъгъл θ ; $d\Omega$ – пространствен ъгъл, под който се вижда светлинният източник от точката.

Известно е, че страничната повърхност на цилиндър е:

$$A_z = \pi dh = 2\pi rh. \quad (5.25)$$



Фиг. 5.6. Определяне на средна цилиндрична осветеност

Светлинният поток $d\Phi$ създава върху страничната повърхност на цилиндъра A_z средна осветеност dE_z :

$$dE_z = \frac{d\Phi}{A_z} = \frac{1}{\pi} dE_n \sin \theta = \frac{1}{\pi} L_\theta \sin \theta d\Omega. \quad (5.26)$$

След интегриране на израз (5.26) в границите на цялото пространство, за средната цилиндрична осветеност се получава:

$$E_z = \int_{4\pi} dE_z = \frac{1}{\pi} \int_{4\pi} \sin \theta dE_n = \frac{1}{\pi} \int_{4\pi} L_\theta \sin \theta d\Omega. \quad (5.27)$$

Международните и националните нормативни документи [10,58,72] дефинират средната цилиндрична осветеност като средноаритметична стойност на вертикалната осветеност E_v в дадена точка от страничната повърхност на цилиндъра:

$$E_z = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} E_v d\varphi, \quad (5.28)$$

където φ е ъгълът между равнината, перпендикулярна на вертикалната ос на цилиндъра и посоката на разпространение на светлинния поток.

За да може светлината да разкрива текстурите и триизмерните форми на обектите, създавайки необходимите контрасти в пространството, е необходимо отношението между средната цилиндрична E_z и хоризонталната

E_h осветеност да бъде в границите [73]: $0,3 \leq \frac{E_z}{E_h} \leq 3$.

От израз (5.27) се вижда, че средната цилиндрична осветеност зависи както от яркостта и геометричните размери на светлинните източници, така и от тяхното разположение спрямо разглежданата точка. Колкото по-близо до вертикалната ос на цилиндъра се намира светлинният източник, т.е. колкото ъгълът θ (респ. $\sin \theta$) е по-малък, толкова и осветеността на страничната повърхност на цилиндъра е по-малка [19]. Осветеността на страничната повърхност на цилиндъра е максимална, когато светлинните източници са разположени на нивото на цилиндъра, т.е. когато светлинният поток пада перпендикулярно на страничната повърхност на цилиндъра – при $\theta = 90^\circ$ ($\sin \theta = 1$).

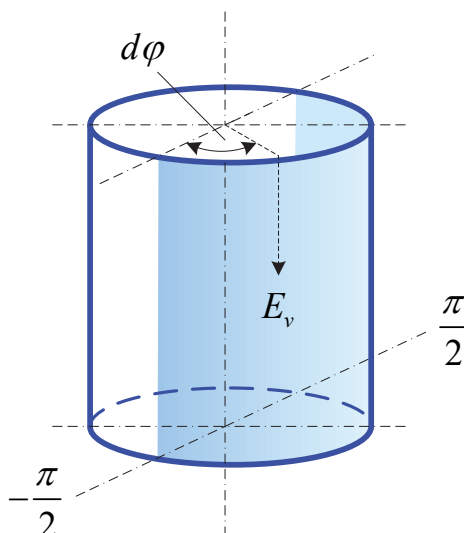
Средната цилиндрична осветеност E_z се използва при количествената оценка на наситеността на пространството със светлина и за идентифициране на триизмерни обекти в обществени и промишлени пространства: телевизионни студия, театрални и концертни зали, щандове за изложения, машини с цилиндрични компоненти (генератори, двигатели, цилиндрични шлифовъчни машини), зони за паркиране, фойета и чакални, салони в ресторанти и др.

Средната полуцилиндрична осветеност E_{cs} [lx], посочена в международните и национални нормативни документи [10,59,72], се дефинира като средноаритметична стойност на вертикалните осветености E_v в точка от страничната повърхност на полуцилиндър с вертикална ос на симетрия (фиг. 5.7) в обхвата на азимутните ъгли $-\frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$:

$$E_{cs} = \frac{1}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} E_v d\varphi. \quad (5.29)$$

Добро балансиране на градиента на осветлението (изменение на осветеността в дадено направление) се получава ако отношението между вертикалната E_v и средната полуцилиндрична E_{cs} осветености е в границите [73]:

$$0,8 \leq \frac{E_v}{E_{sc}} \leq 1,3.$$



Фиг. 5.7. Определяне на средна полуцилиндрична осветеност

Средната полуцилиндрична осветеност е важна величина, която определя скоростта на възприемане на триизмерни обекти. Тя се използва за идентифициране на лица и обекти в пешеходни зони, места за паркиране, в райони с повишена честота на криминалните прояви и др. В стандарта за улично осветление се нормира минималната стойност на полуцилиндричната осветеност за светлотехнически класове Р и SC – пешеходни зони, зони за велосипедисти и аварийни ленти до пътните платна [12].

6. ОПТИЧНИ СВОЙСТВА НА ТЕЛАТА. ОТРАЖЕНИЕ, ПРОПУСКАНЕ, ПОГЛЪЩАНЕ И ПРЕЧУПВАНЕ НА СВЕТЛИНАТА

6.1. Оптични свойства на телата

При разпространение на светлинен лъч в определена среда, неминуемо се достига граница, отделяща я от друга среда, при което се проявява едно или повече от следните оптични свойства [41,73]:

- *отражение*, при което светлинният лъч се връща обратно в първата среда;
- *поглъщане*, при което светлинният лъч остава във втората среда и светлинната енергия се преобразува в друга форма;
- *пречупване*, при което светлинният лъч променя посоката си на разпространение при преминаване от една среда в друга с различни параметри, или в същата среда, но с променени параметри. Ако светлинният лъч продължава хода си и преминава през втората среда в следваща (или отново към първата – при стъкло, разсейвател и др.), има *пропускане*.

Оптичните свойства на телата и характеристиките на взаимодействията между светлината и обектите са от важно значение както за правилния избор и проектиране на елементите на осветлението, така и за коректното

изпълняване на визуалните задачи в живота на човека. Ефективността и светлоразпределението на осветителите силно зависи от отражателните характеристики на материалите, използвани за отражатели, характеристиките на пропускане на светлината от разсейвателите и пречупващите характеристики на оптичните лещи, преразпределящи светлината. Качеството на осветлението на обектите и визуалните задачи, свързани с тях, зависи от светлинните свойства на материалите, от които те са изработени. Съществено значение при редица задачи имат и цветовете характеристики на материалите: ефектно, сценично и художествено осветление, разпознаване на пътни знаци, табели и др. [41].

6.2. Отражение, пропускане, поглъщане и пречупване на светлината

Принципът за съхранение на енергията гласи, че светлинният поток Φ , който пада върху даден материал, е равен на сумата от отразения Φ_ρ , погълнатия Φ_α и пропуснатия Φ_τ от материала светлинен поток:

$$\Phi = \Phi_\rho + \Phi_\alpha + \Phi_\tau. \quad (6.1)$$

Ъгълът на падане на светлинния поток спрямо нормалата n към повърхността на материала от фиг. 6.1 е означен с θ_1 , ъгълът на отражение – с θ_2 , и ъгълът на пропускане – θ_3 .

Отношенията на отразения, погълнатия и пропуснатия към падналия върху материала светлинен поток се наричат съответно коефициенти на отражение ρ , на поглъщане α и на пропускане τ на светлината [19,41]. Тези коефициенти се определят със следните равенства:

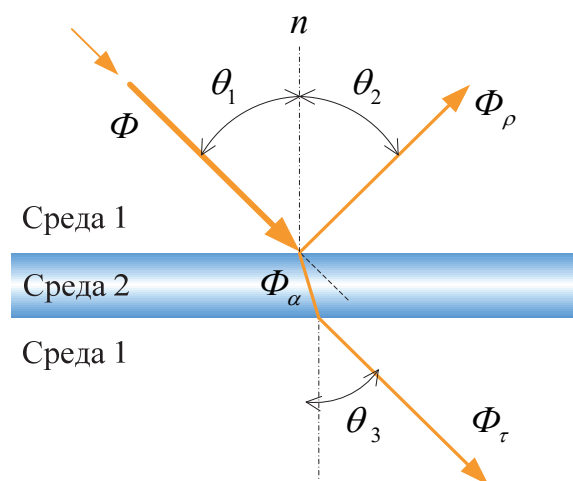
$$\rho = \frac{\Phi_\rho}{\Phi}, \quad \alpha = \frac{\Phi_\alpha}{\Phi}, \quad \tau = \frac{\Phi_\tau}{\Phi}. \quad (6.2)$$

Светлинният поток, който пада върху един материал, частично се отразява от неговата повърхност, частично се поглъща, а в някои случаи част от потока се пропуска от материала (фиг. 6.1).

Съгласно принципа за съхранение на енергията следва, че:

$$\rho + \alpha + \tau = 1. \quad (6.3)$$

Преразпределението на отразения и пропуснатия от материалите светлинен поток в пространството може да бъде *насочено (огледално)*, *разсеяно (дифузно)* и *смесено насочено-разсеяно*.



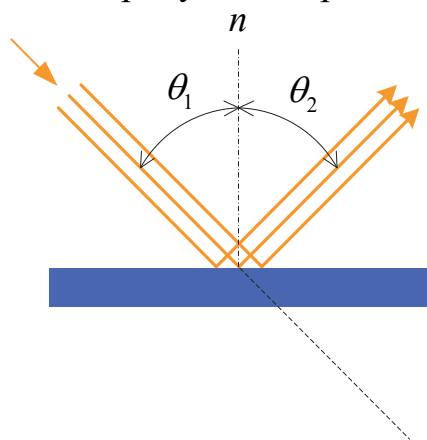
Фиг. 6.1. Разпределение на падащия светлинен поток върху прозрачен материал

а) Насочено (огледално) отражение и пропускане на светлината

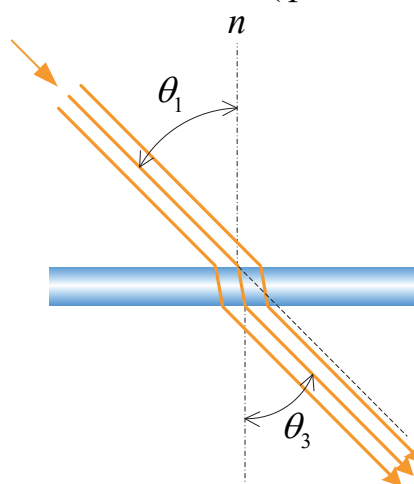
Материали с гладки огледални повърхности, размерът на грапавините на които е по-малък от дължината на вълната на светлината – полирани метални повърхности, стъклени огледала и др., насочено (огледално) отразяват светлината. Насочено пропускат светлината прозрачните еднородни материали – прозрачно стъкло, оптичен течен силиконов каучук, чист полиметилметакрилат (акрилна смола, наричана още плексиглас) и др. [19,41,110].

Основните принципи при насочено отражение и пропускане на светлината (фиг. 6.1, 6.2а и 6.2б) са:

- пространственият ъгъл, под който пада светлинният поток е равен на пространствения ъгъл, в който потокът се отразява или пропуска;
- ъгълът на отражение е равен на ъгъла на падане – $\theta_2 = \theta_1$ (фиг. 6.2а), и ъгълът на пропускане е равен на ъгъла на падане – $\theta_3 = \theta_1$ (фиг. 6.2б).



Фиг. 6.2а. Насочено отразяване на светлината



Фиг. 6.2б. Насочено пропускане на светлината

Яркостта на насочено отразяващ или насочено пропускащ светлината материал има определена стойност само в посоката на отразения, респ. на пропуснатия светлинен лъч, а във всички останали посоки тя е нула [19]. Яркостта на отражение L_ρ е по-малка от яркостта L на реалния светлинен източник, т.е.:

$$L_\rho = \rho L. \quad (6.4)$$

Яркостта на светлинен източник, наблюдаван през прозрачен материал с коефициент на пропускане на светлината τ , се определя аналогично:

$$L_\tau = \tau L. \quad (6.5)$$

Пречупване на светлината се наблюдава при преминаването ѝ на границата между две прозрачни среди, които имат различни оптични свойства. Пречупването на светлината се изразява в промяна на посоката ѝ на разпространение при преминаване от една в друга среда с променени параметри, което води и до промяна на скоростта на разпространение. Скоростта на светлината намалява, ако плътността на новата среда е по-висока, и се увеличава, ако е по-ниска. Например, при преминаване на светлината през границата въздух – стъкло се наблюдава пречупване на светлината. Това свойство се използва за създаване на оптични лещи и е в основата на действие на всички оптични устройства. Чрез пречупването на светлината се обясняват и много светлинни явления – небесната дъга, дисперсията (разлагането) на бялата светлина на цветове при преминаването ѝ през призма и др.

При пречупване на светлината има два основни принципа:

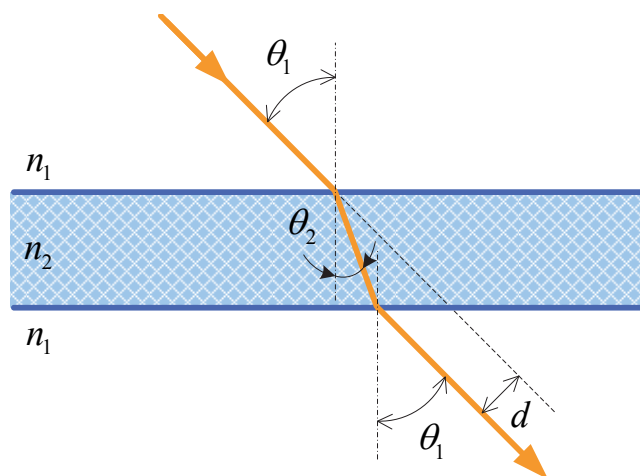
- отразеният и пропуснатият лъч лежат в една равнина с падащия лъч и нормалата към повърхността в точката на падане на лъча (фиг. 6.1);
- отношението на синусите на ъглите на падане и пречупване на светлината на граничната повърхност между две среди е равно на отношението на съответните скорости на светлината в тях и обратнопропорционално на отношението на техните показатели (коефициенти) на пречупване (фиг. 6.3).

Вторият принцип е известен като *закон на Снелиус* за пречупване на светлината и се представя в следния вид:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}, \quad (6.6)$$

където: θ_1 – ъгъл на падане на светлината; θ_2 – ъгъл на пречупване на светлината; v_1 – скорост на светлината в първата среда; v_2 – скорост на светлината във втората среда; n_1 – показател на пречупване на първата среда; n_2 –

показател на пречупване на втората среда; n_{21} – относителен показател на пречупване на втората среда спрямо първата (фиг. 6.3) [73].



Фиг. 6.3. Пречупване на светлината на границата между две среди

Разстоянието d е известно като изместване и зависи от ъгъла на падане и от показателя на пречупване. Когато падащият лъч е перпендикулярен на повърхността, пречупването и изместването са равни на нула.

Когато първата среда е въздух, $n_1 = 1$ и може да се запише, че:

$$\sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2. \quad (6.7)$$

б) Разсеяно (дифузно) отражение и пропускане на светлината

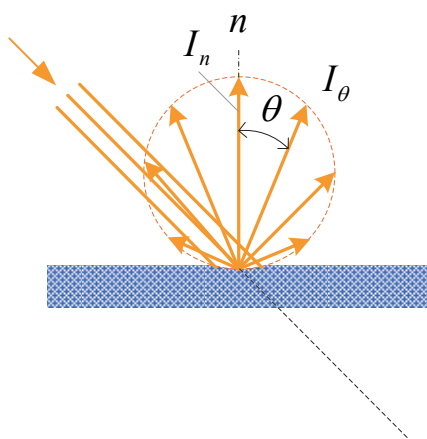
Материалите с грапавини (неравности), чиито размери са по-големи от дължината на вълната, отразяват или пропускат светлината разсеяно. Такива материали са бариев сулфат, политетрафлуоретилен (PTFE, познат с наименование тефлон), гипсови повърхности, профили от пресован магнезиев оксид и др. Дифузно пропускат светлината материали, в обема на които има частици с различни коефициенти на пречупване на светлинните лъчи и с размери, близки с тези на дължината на вълната във видимия спектър, например млечно и опалово стъкло, бяла пластмаса и др. [19,41].

Дифузно отразеният (или дифузно пропуснатият) светлинен поток се разпространява в цялото пространство над отразяващата (или под пропускащата) повърхност, т.е. в областта на пространствения ъгъл 2π , независимо от ъгъла на падане θ_1 на светлината (фиг. 6.4а и 6.4б).

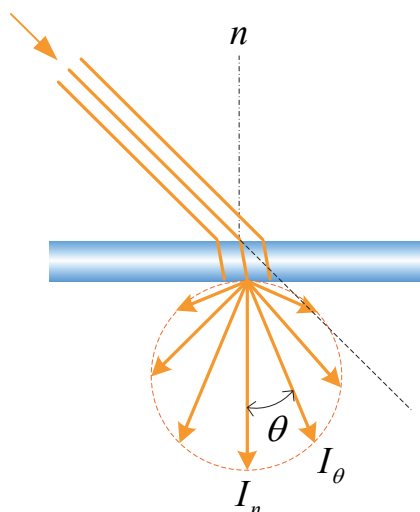
Разпределението на отразения и пропуснатия светлинен поток в пространството се представя графично чрез радиус-вектори, чиято големина е равна на интензитета на светлината I_θ , съответстваща на отразения или на пропуснатия светлинен поток в посоката на радиус-вектора. Началото на всички радиус-вектори е точката, в която пада светлинният лъч. Краищата на радиус-векторите определят фотометричната повърхност на отра-

зената и пропуснатата светлина. Характерно за дифузното отражение е, че яркостта на отразяващия равнинен елемент A е еднаква във всички посоки:

$$L_{\theta} = \frac{I_{\theta}}{A \cos \theta} = \text{const.} \quad (6.8)$$



Фиг. 6.4а. Разсеяно отразяване на светлината



Фиг. 6.4б. Разсеяно пропускане на светлината

Фотометричната повърхност представлява сфера, която тангира към отразяващата повърхност в точката на падане на светлината. Пресечната крива на фотометричната повърхност с вертикалната равнина на падане на светлината е окръжност (фиг. 6.4а), която се определя с изрази:

$$I_{\theta} = I_n \cos \theta, \quad (6.9)$$

където: I_n – интензитет на светлината по направление на нормалата n към повърхността (има максимална стойност, т.е. $I_n = I_m$); θ – ъгъл между нормалата към повърхността и разглежданото направление с интензитет на светлината I_{θ} (фиг. 6.4а).

Израз (6.9) е известен като *косинусов закон на Ламберт*. Той се отнася за идеални дифузно отразяващи (пропускащи) повърхности. Тъй като интензитетът на светлината и видимата площ се изменят по косинусовия закон на Ламберт, тяхното отношение остава постоянно при изменение на ъгъл θ , съгласно израз (6.8). Следователно яркостта остава постоянна, докато интензитетът на светлината не [41,73,83,87].

От закона на Ламберт се определя отразеният светлинен поток:

$$\Phi_{\rho} = \rho \Phi = 2\pi \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\theta} \sin \theta d\theta d\phi = 2\pi \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_m \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi = \pi I_m, \quad (6.10)$$

където I_m е максималният интензитет на светлината.

Като се разделят двете части на уравнение (6.10) на площта A , се получава светимостта:

$$M = \rho E = \pi L, \quad (6.11)$$

тъй като за яркостта (виж т. 4) е известно, че: $L = \frac{\rho}{\pi} E$.

При дифузно пропускане на светлината зависимостите са подобни:

$$\Phi_{\tau} = \tau \Phi = \pi I_m; \quad (6.12)$$

$$M = \tau E = \pi L; \quad (6.13)$$

$$L = \frac{\tau}{\pi} E. \quad (6.14)$$

в) Насочено-разсеяно отражение и пропускане на светлината

Материали с идеално насочено и идеално разсеяно отражение и пропускане няма. В съществуващите (реални) материали има и двете разновидности на отражение и пропускане едновременно, т.е. те проявяват насочено-разсеяно отражение или пропускане на светлината.

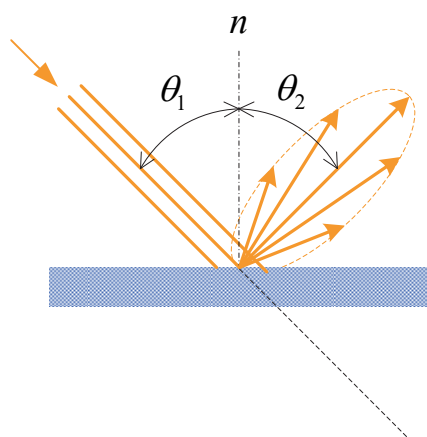
При материалите с насочено-разсеяно отражение (пропускане) на светлината пространственият ъгъл, в който пада светлинният поток на повърхността, е по-малък от пространствения ъгъл, в пределите на който се излъчва отразеният (пропуснатият) от материала светлинен поток.

Яркостта на насочено-разсеяно отразяващ или пропускащ светлината материал не е еднаква в различните посоки (фиг. 6.5а и 6.5б). Тя е максимална в посоката на огледалното отражение ($\theta_1 = \theta_2$ – фиг. 6.5а) или огледалното пропускане ($\theta_1 = \theta_3$ – фиг. 6.5б) и може да се определи с израза:

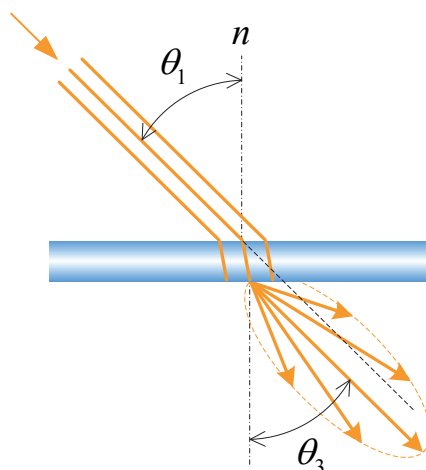
$$L_{\rho} = \rho_{spec} L + \frac{\rho_{diff} E}{\pi}, \quad (6.15)$$

където: L – яркост на светлинния източник; E – осветеност на отразяващата повърхност; ρ_{spec} – коефициент на насочено отражение; ρ_{diff} – коефициент на дифузно отражение.

Насочено-разсеяно отразяват светлината матираните повърхности. Разсейването на светлината се дължи на наличието на малки повърхностни участъци с различно ориентирани нормали. Насочено-разсеяно отразяват материали с обработени по химичен път метални повърхности. Насочено-разсеяно пропускат светлината прозрачни материали, на които едната или двете повърхности са матирани, например опалово стъкло, млечно стъкло, бяла пластмаса и др. [19,21,41].

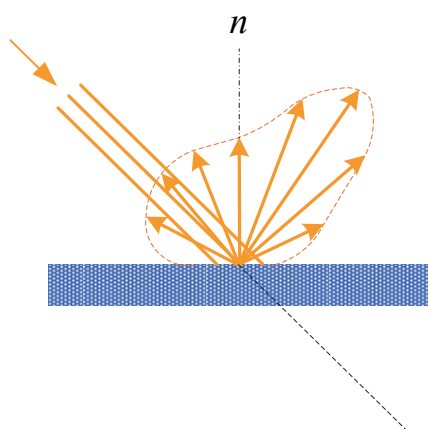


Фиг. 6.5а. Насочено-разсеяно отразяване на светлината

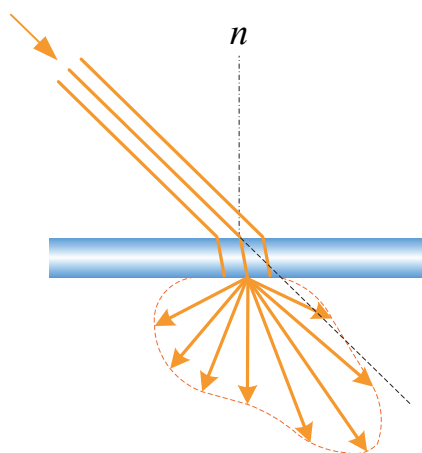


Фиг. 6.5б. Насочено-разсеяно пропускане на светлината

Разновидност на насочено-разсеяно отразяване и пропускане на светлината е *смесеното* отражение и пропускане. При смесеното отражение и пропускане част от падналия върху материала светлинен поток се отразява и пропуска насочено, а друга част дифузно (фиг. 6.6а и 6.6б). Яркостта е максимална по посока на насочено-отразените и насочено-пропуснати светлинни лъчи. Отразяващата, респ. пропускащата, повърхност се състои от плоски гладки участъци и вдлъбнатини с размери, по-големи от дължината на вълната във видимия спектър.



Фиг. 6.6а. Смесено отразяване на светлината



Фиг. 6.6б. Смесено пропускане на светлината

Реалните характеристики на отражение или пропускане на материалите са смесени, като в зависимост от ъгъла на падане θ_1 има отразени или пропуснати лъчи в различни посоки и големина, т.е. $\rho(\theta_1, \theta_2)$ и $\tau(\theta_1, \theta_3)$.

В светлотехническата практиката, където е необходимо отчитане на реални отражателни характеристики, функцията $\rho(\theta_1, \theta_2)$ се представя като таблична и представя т.нар. индикатриса на отражение на повърхността. При компютърна симулация на осветление и в компютърната графика се използват опростени аналитични модели, при които се реализира висока фотореалистичност на получаваните изображения. Например при модела на Фонг, смесеното реално отражение се получава като сума от дифузна съставляваща на ρ_{diff} и огледална съставляваща ρ_{spec}^θ на отражението, където степеният показател θ задава степента на острота на огледалното отражение на материала [41].

6.3. Коефициент на яркост. Спектрални и интегрални коефициенти на отражение, пропускане и поглъщане на светлината

а) Коефициент на яркост

За количествено характеризиране на отражателните свойства на повърхностите се използва показателят *коефициент на яркост* q . Той се използва предимно за изчисляване на яркостта на улични осветителни уредби (фиг. 6.7) [27]. Коефициентът на яркост се определя с отношението на яркостта на елементарна повърхност в дадена посока при определен ъгъл на падане на светлината и осветеността E на средата:

$$q = \frac{L}{E}. \quad (6.17)$$

Коефициентът на яркост се измерва в $[\text{sr}^{-1}]$.

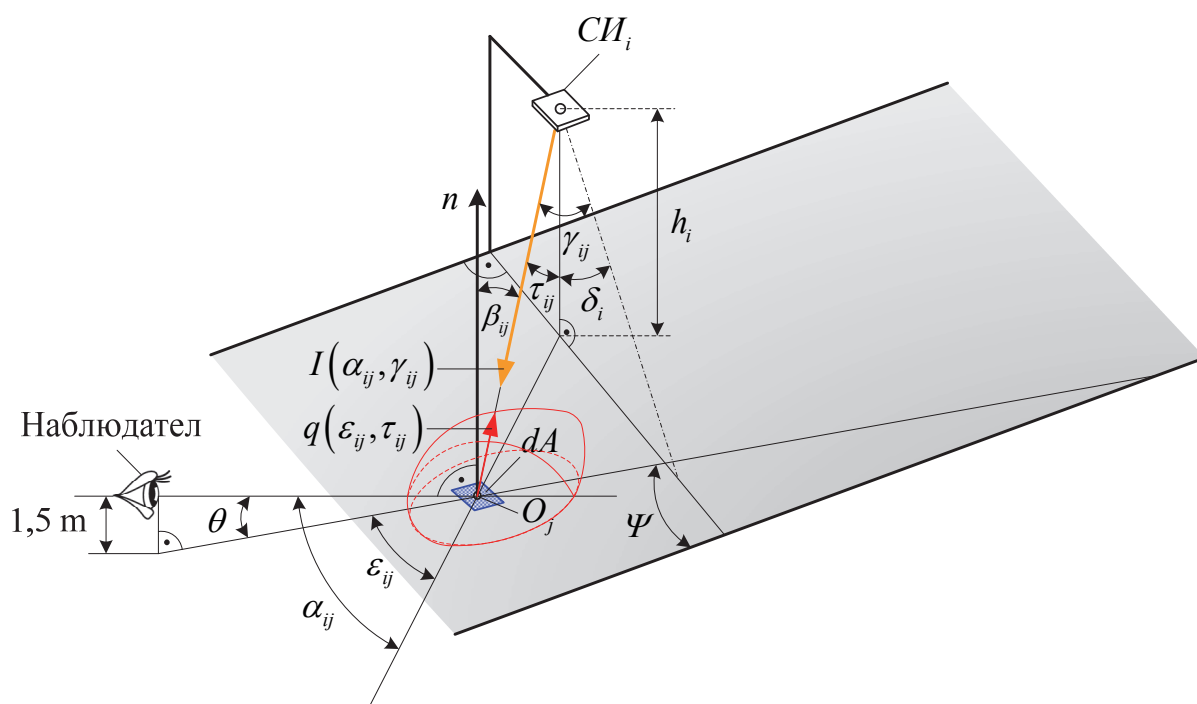
Коефициентът на яркост q зависи от светлотехническите характеристики на материала (пътната настилка за улични осветителни уредби), от местоположението на наблюдателя и от разположението на светлинния източник $СИ_i$ (с височина h_i) спрямо разглежданата точка O_j от фиг. 6.7, т.е. получава се функцията $q = f(\varepsilon_{ij}, \tau_{ij}, \theta, \Psi)$.

Нормативните изисквания за светлотехническите стандарти за улично осветление се дефинират за зона от пътя с дължина между 60 m и 160 m пред наблюдателя, която се счита за важна при навременно откриване на препятствия, и скорост на движение, по-малка или равна на 90 km/h. Като се имат предвид основните широчини на пътните платна и възможните разстояния от позицията на наблюдателя до точката O_j , в повечето случаи ъгъл $\theta = 1^\circ$, а ъгъл Ψ не е по-голям от $\pm 20^\circ$ и коефициентът на яркост малко зависи от тези ъгли. Следователно функцията придобива следния вид: $q = f(\varepsilon_{ij}, \tau_{ij})$ [27,95].

Въз основа на функцията $q = f(\varepsilon_{ij}, \tau_{ij}, \theta, \Psi)$ и израз (6.17), за яркостта L_j в точка O_j се получава:

$$L_j = \sum_{i=1}^N q(\varepsilon_{ij}, \tau_{ij}) \cdot \frac{I(\alpha_{ij}, \gamma_{ij}) \cos \beta_{ij}}{\frac{h_i^2}{\cos^2 \tau_{ij}}} = \sum_{i=1}^N r(\varepsilon_{ij}, \tau_{ij}) \frac{I(\alpha_{ij}, \gamma_{ij})}{h_i^2}, \quad (6.18)$$

където: $r(\varepsilon_{ij}, \tau_{ij})$ – редуциран коефициент на яркост [sr^{-1}]; N – брой на светлинните източници (осветители), осветяващи точката O_j ; τ_{ij} – ъгълът между нормалата n към повърхността, съдържаща точката O_j , и разглежданата посока на интензитета на светлината $I(\alpha_{ij}, \gamma_{ij})$.



Фиг. 6.7. Определяне на коефициента на яркост

След 1980 г. по практически причини коефициентът на яркост q се заменя с редуцирания коефициент на яркост r . От уравнение (6.18) се вижда, че той се определя с израза:

$$r(\varepsilon_{ij}, \tau_{ij}) = q \cos^3 \tau_{ij}. \quad (6.19)$$

Редуцираният коефициент на яркост r се измерва в [sr^{-1}].

За стандартизирани класове на пътни настилки са изготвени т.нар. r -таблицы, в които е дадена зависимостта на редуцирания коефициент на яркост r от ъглите ε , β и ъгъл τ ($\tan \tau$) при стандартизирана височина на наблюдателя 1,5 m и постоянен ъгъл на наблюдение $\theta = 1^\circ$. В БДС EN 13201 r -таблицата се разширява, тъй като се отчитат улични осветителни уредби с осветителите при височина $h < 2$ m [12].

За оценка на яркостта на пътните настилки се въвежда показателят *средна стойност на коефициента на яркост при дифузно осветление* Q_0 . Той представлява коефициентът на яркост в дадено поле и осветеността на равнината в същото поле при дифузно осветление и посока на наблюдение към точката O_j от пътната настилка [27,51].

Табл. 6.1. R-класове на сухи настилки

Клас R	Q_0 [cd/m ² /lx]	S_1	S_2	Тип на отражение	Тип на повърхност и материал
R1	0,10	0,25	0,53	Предимно дифузно	Циментова настилка; асфалтова настилка, където над 80 % от камъчетата се подават над асфалта
R2	0,07	0,58	1,8	Частично насочено	Положен нов асфалт; груб асфалтен слой, където най-малко 60 % от камъчетата са по-големи от 10 mm.
R3	0,07	1,11	2,38	Частично насочено	Асфалтен слой със зърна, помалки от 10 mm; груб асфалт, полиран поради изхабяване
R4	0,08	1,55	3,03	Предимно насочено	Мазен асфалт; изхабен асфалт
R5	-	> 1,8	> 3,55	Изразено насочено	Преобладаващо мазен асфалт с малко съдържание на чакъл с малка грануляция и голямо количество на свързващо вещество

Средната стойност на яркостния фактор при дифузно осветление се измерва в [cd/m²/lx].

Яркостните характеристики на пътната настилка се определят по методиката на CIE, като е необходимо да се изчислят средният коефициент на яркост при дифузно осветление Q_0 и коефициентите на огледалност S_1 и S_2 [27,50,51,68,95]. CIE класифицира пътните настилки в четири стандартни класа на отражение, дадени в табл. 6.1 [27,50]. При влажни настилки на пътните платна се дефинират светлотехнически класове W1 ÷ W4.

Средният коефициент на яркост при дифузно осветление Q_0 се определя с изрази:

$$Q_0 = \frac{1}{\Omega_0} \int q d\Omega, \quad (6.20)$$

където Ω_0 е пространствен ъгъл, определен за посоката на наблюдателя.

Коефициентите на огледалност S_1 и S_2 се определят с равенствата:

$$S_1 = \frac{q(\varepsilon = 0^\circ; \tan \tau = 2)}{q(\varepsilon = 0^\circ; \tan \tau = 0)} \text{ и } S_2 = \frac{Q_0}{q(\varepsilon = 0^\circ; \tan \tau = 0)}. \quad (6.21)$$

Коефициентите на огледалност определят компонентната на насоченото отражение на материалите.

б) Спектрални и интегрални коефициенти на отражение, пропускане и поглъщане на светлината

Повечето материали отразяват, поглъщат и пропускат светлината избирателно, в резултат на което коефициентите на отражение, на поглъщане и на пропускане не са еднакви за различните дължини на вълната от видимия спектър [19,41].

За количествена оценка на отразяващите, поглъщащите и пропускащите свойства на материалите при различни дължини на вълната се въвеждат понятията *спектрален коефициент на отражение* ρ_λ , *на поглъщане* α_λ и *на пропускане* τ_λ на светлината, които се определят с изразите:

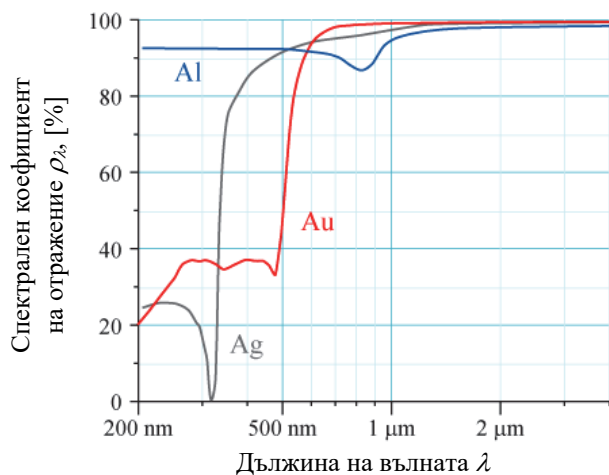
$$\rho_\lambda = \frac{(\Phi_\lambda)_\rho}{\Phi_\lambda}, \quad \alpha_\lambda = \frac{(\Phi_\lambda)_\alpha}{\Phi_\lambda}, \quad \tau_\lambda = \frac{(\Phi_\lambda)_\tau}{\Phi_\lambda}, \quad (6.22)$$

където: Φ_λ – еднороден светлинен поток, падащ върху материала; $(\Phi_\lambda)_\rho$, $(\Phi_\lambda)_\alpha$ и $(\Phi_\lambda)_\tau$ – съответно отразеният, погълнатият и пропуснатият от материала еднороден светлинен поток.

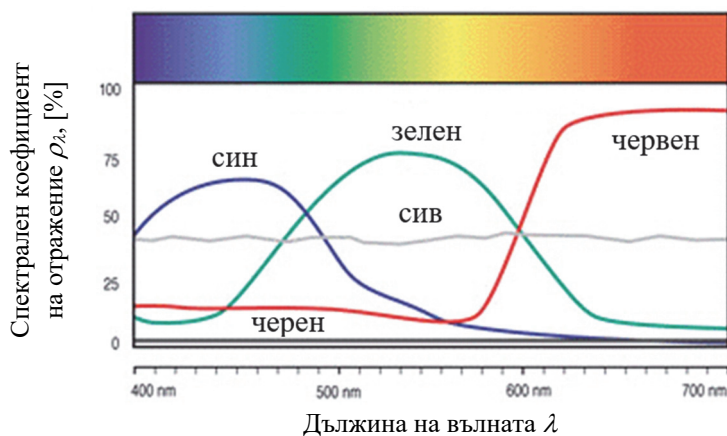
Спектралният състав на падащия светлинен поток се изменя при избирателно отражение или пропускане, в резултат на което цветът на повърхностите на един селективно отразяващ или пропускащ светлината материал зависи както от спектралния състав на светлинния поток, който пада върху него, така и от спектралните коефициенти ρ_λ и τ_λ [19].

На фиг. 6.8 и 6.9 са представени в графичен вид спектралните коефициенти на отражение ρ_λ в [%] на някои метали – алуминий (Al), злато (Au) и сребро (Ag), и примерни цветни материали.

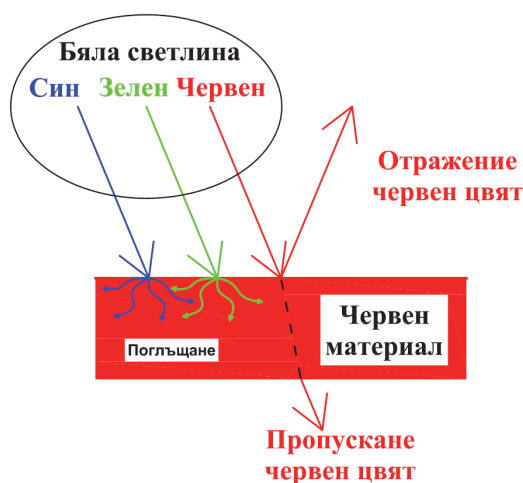
Цветните материали отразяват и пропускат преобладаващо светлина в тази част на спектъра, която отговаря на техния цвят. Благодарение на това тяхно свойство човешкото око различава цветовете им. Например, при попадане на пълен спектър бяла светлина върху червен материал, от него се отразява и през него се пропуска само червената част от спектъра – фиг. 6.10, които при достигане до човешкото око възбуждат в ретината само конусовидните L-рецептори, чувствителни към червена светлина, в резултат на което информация за червен обект достига до мозъка. Материалите с цвят от гамата на сивото (от бяло до черно) имат сравнително равномерни коефициенти на отражение и пропускане за различните дължини на вълните от видимия спектър [41].



Фиг. 6.8. Спектрални коефициенти на отражение на някои метали



Фиг. 6.9. Спектрални коефициенти на отражение на цветни материали



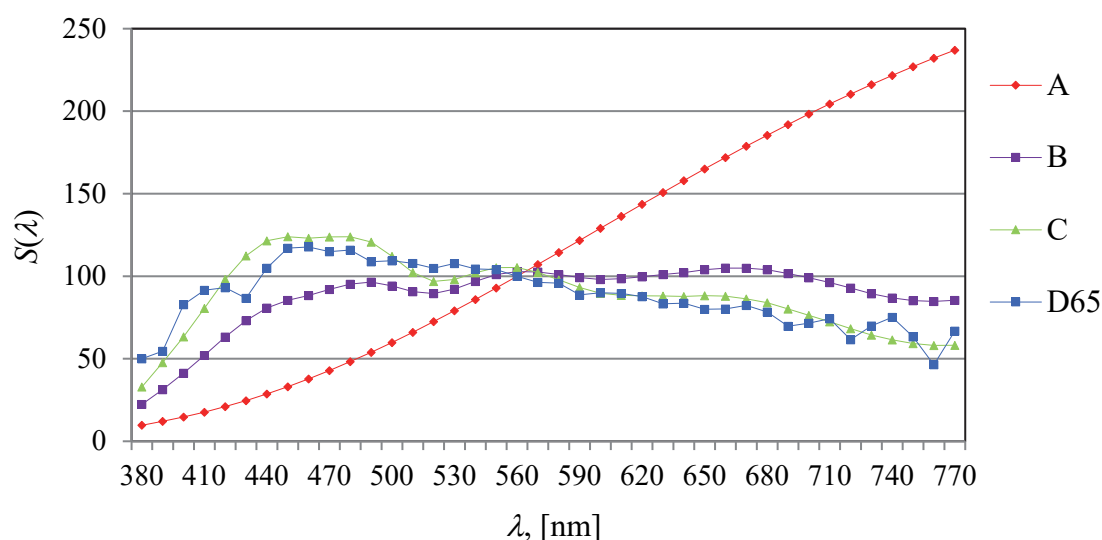
Фиг. 6.10. Селективно отразяване и пропускане на светлината

За обща оценка на отразяващите, поглъщащите и пропускащите свойства на материалите за целия видим спектър на светлината се дефини-

рат съответните интегрални коефициенти. При известна спектрална интензивност на лъчистия поток $\Phi_{e,\lambda}$, относителна спектрална светлинна ефективност за дневно зрение $V(\lambda)$ и спектрални коефициенти на отражение ρ_λ , поглъщане α_λ и пропускане τ_λ на материала, интегралните коефициенти се получават съответно:

$$\rho = \frac{\int_{\lambda_1=380\text{nm}}^{\lambda_2=770\text{nm}} \Phi_{e,\lambda} V(\lambda) \rho_\lambda d\lambda}{\int_{\lambda_1=380\text{nm}}^{\lambda_2=770\text{nm}} \Phi_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda}, \quad \alpha = \frac{\int_{\lambda_1=380\text{nm}}^{\lambda_2=770\text{nm}} \Phi_{e,\lambda} V(\lambda) \alpha_\lambda d\lambda}{\int_{\lambda_1=380\text{nm}}^{\lambda_2=770\text{nm}} \Phi_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda}, \quad \tau = \frac{\int_{\lambda_1=380\text{nm}}^{\lambda_2=770\text{nm}} \Phi_{e,\lambda} V(\lambda) \tau_\lambda d\lambda}{\int_{\lambda_1=380\text{nm}}^{\lambda_2=770\text{nm}} \Phi_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda}. \quad (6.23)$$

Интегралните коефициенти на отражение ρ , поглъщане α и пропускане τ зависят не само от свойствата на материала, а също и от спектралния състав на светлинния източник.



Фиг. 6.11. Относително спектрално разпределение на мощността на излъчване $S(\lambda)$ на CIE стандартни светлинни източници A, B, C и D65

Стандартът ISO 11664-2/CIE S 014-2 дефинира за използване в колориметрията характеристиките на т.нар. CIE стандартни светлинни източници [18,41,74]:

- CIE стандартен светлинен източник тип A с относително спектрално разпределение на мощността на излъчване $S(\lambda)$ с температура 2855,5 K;
- CIE стандартен светлинен източник тип D65 с относително спектрално разпределение на мощността на излъчване $S(\lambda)$, съответстваща на дневната светлина с корелирана цветна температура 6500 K (наричана още „номинална корелирана цветна температура на дневен светлинен източник“);
- CIE стандартен светлинен източник тип B с корелирана цветна температура 4874 K;

- CIE стандартен светлинен източник тип C с корелирана цветна температура 6774 K.

Табл. 6.2. Относително спектрално разпределение на мощността на излъчване $S(\lambda)$ на CIE стандартни светлинни източници

λ , [nm]	$S(\lambda)$ за CIE стандартен свет- линен източник - тип				λ [nm]	$S(\lambda)$ за CIE стандартен свет- линен източник - тип			
	A	B	C	D65		A	B	C	D65
380	9,75	22,4	33	50	580	114,44	101	97,8	95,8
390	12,09	31,3	47,7	54,6	590	121,73	99,2	93,2	88,7
400	14,71	41,3	63,3	82,8	600	129,04	98	89,7	90
410	17,68	52,1	80,6	91,5	610	136,34	98,5	88,4	89,6
420	21	63,2	98,1	93,1	620	143,62	99,7	88,1	87,7
430	24,67	73,1	112,4	86,7	630	150,83	101	88	83,3
440	28,7	80,8	121,5	104,9	640	157,98	102,2	87,8	83,7
450	33,09	85,4	124	117	650	165,03	103,9	88,2	80
460	37,82	88,3	123,1	117,8	660	171,96	105	87,9	80,2
470	42,87	92	123,8	114,9	670	178,77	104,9	86,3	82,3
480	48,25	95,2	123,9	115,9	680	185,43	103,9	84	78,3
490	53,91	96,5	120,7	108,8	690	191,93	101,6	80,2	69,7
500	59,86	94,2	112,1	109,4	700	198,26	99,1	76,3	71,6
510	66,06	90,7	102,3	107,8	710	204,41	96,2	72,4	74,3
520	72,5	89,5	96,9	104,8	720	210,36	92,9	68,3	61,6
530	79,13	92,2	98	107,7	730	216,12	89,4	64,4	69,9
540	85,95	96,9	102,1	104,4	740	221,66	86,9	61,5	75,1
550	92,91	101	105,2	104	750	227	85,2	59,2	63,3
560	100	102,8	105,3	100	760	232,11	84,7	58,1	46,4
570	107,18	102,6	102,3	96,3	770	237,01	85,4	58,2	66,8

Относителното спектрално разпределение на мощността на излъчване $S(\lambda)$ за различните CIE стандартни светлинни източници са показани в табл. 6.2 и на фиг. 6.11.

В табл. 6.3. са дадени примерни стойности на коефициентите ρ , τ и α за някои по-разпространени материали и типа на тяхното отражение и/или пропускане за спектрален състав на CIE стандартен източник тип A [41].

Табл. 6.3. Тип на отражение и пропускане и стойности на коефициенти на отражение ρ и пропускане τ на някои материали

Тип отражение или пропускане	Материал	ρ	τ
Насочено отражение (фиг. 6.2а)	Сребро полирано	0,92 ÷ 0,97	-
	Огледало стъклено	0,80 ÷ 0,85	-
	Алуминий полиран	0,75 ÷ 0,85	-
	Алуминий изпарен във вакуум	0.90 ÷ 0.95	-
	Хром полиран	0,60 ÷ 0.70	-
	Стомана полирана	0.50 ÷ 0,60	-
Насочено пропускане (фиг. 6.2б)	Стъкло прозрачно с дебелина (2 ÷ 3) mm	0,05	0,92
Разсеяно отражение (фиг. 6.4а)	Бариев сулфат	0,97	-
	Гипс	0,70 ÷ 0,80	-
	Хартия бяла	0,75	0.05
Разсеяно пропускане (фиг. 6.4б)	Стъкло млечно с дебелина (2 ÷ 3) mm	0,50	0,35
	Стъкло опалово с дебелина (2÷3) mm	0,20	0,70
	Пластмаса бяла с дебелина (2÷3) mm	0,30	0,55

7. ЦВЯТ. ЦВЕТОВИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА СВЕТЛИННИТЕ ИЗТОЧНИЦИ

6.1. Характеристики на цвета

Цветът е субективна психофизиологична интерпретация на видимото излъчване от електромагнитния спектър. Получаваната по зрителен път информация се основава на способността на човешкото око да възприема непосредствено яркостта и цвета на наблюдаваните обекти.

Цветът е едно от основните и характерни качества на всеки обект. Обектите се отличават по цвят в зависимост от техните оптични свойства. В действителност обектите нито имат, нито произвеждат цвят. Те притежават оптични свойства да отразяват, пречупват, пропускат и поглъщат монохроматичните излъчвания (цветовете) на светлината, която получават, т.е. наборът от допълнителни монохроматични усещания, които човешкият мозък интерпретира като цвят на даден обект, зависи от спектралния състав на светлината, която осветява този обект, и от оптичните свойства на обекта да отразява [19,73].

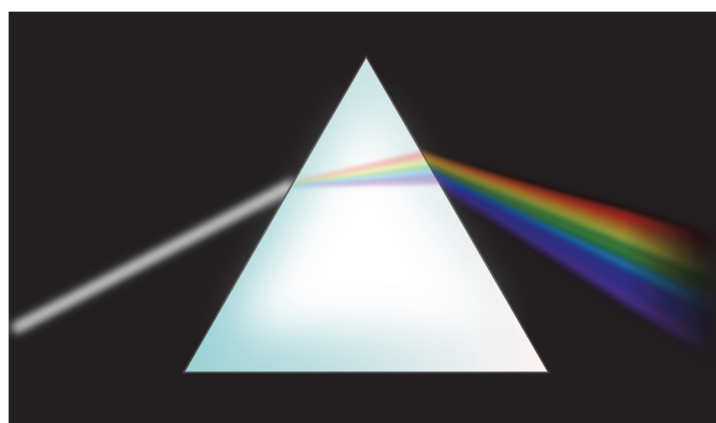
Няма рязко определени граници на цветовете от видимия спектър, тъй като те преливат от един в друг. Въпреки това могат да се разграничат отделни области. Видимата част на спектъра условно е прието да се под-разделя на осем области, чиито граници са показани в табл. 7.1.

Табл. 7.1. Цветови области на видимия спектър

Възприемане на цвета	Дължина на вълната λ , [nm]	Честота f , [THz]
виолетов	380 ÷ 450	790 ÷ 680
син	450 ÷ 480	680 ÷ 620
небесносин	480 ÷ 510	620 ÷ 600
зелен	510 ÷ 550	600 ÷ 550
жълтозелен	550 ÷ 575	550 ÷ 530
жълт	575 ÷ 585	530 ÷ 510
оранжев	585 ÷ 620	510 ÷ 480
червен	620 ÷ 770	480 ÷ 405

Видимият спектър не съдържа всички цветове, които човешкото око може да различи. От видимия спектър, например, отсъстват кафявият, розовият и пурпурният цвят, а белият цвят се получава при смесване на всички видими цветове, докато черният цвят е липса на видима светлина.

За първи път Нютон открива разлагането на бялата светлина в групата от цветове, които образуват дъгата. Когато бял светлинен лъч преминава през призма, се получава същият ефект като този, показан на фиг. 7.1 [114].

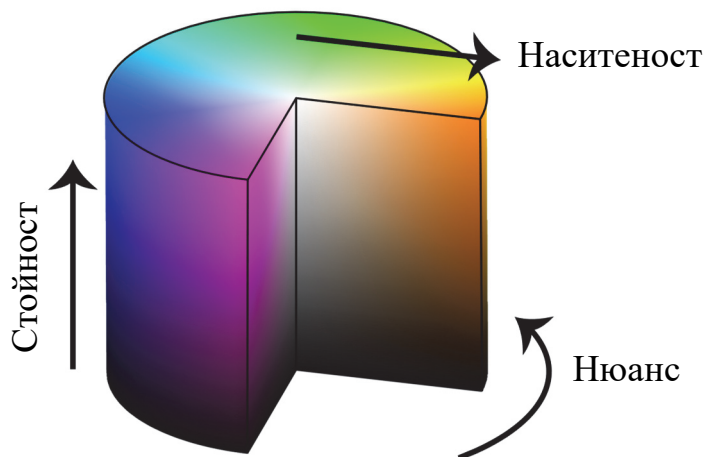


Фиг. 7.1. Триъгълна призма, разлагаща бялата светлина

Основните качествени и количествени характеристики на цвета са *цветност* и *количество на оцветяването излъчване*, показани на фиг. 7.2

за съставения от Нютон цветови кръг [107]. Чрез цветовия кръг се проследяват основните закономерности на смесването на цветовете.

Цветността на излъчването се характеризира с параметрите *нюанс* (цветови тон) и *наситеност* (чистота на цвета).



Фиг. 7.2. Триъгълна призма, разлагаща бялата светлина

Нюансът (hue, tone) се определя от дължината на вълната λ на спектралния цвят, участващ в смесването.

Наситеността (saturation, color purity) s определя чистотата на цвета, т.е. смесването на монохроматичен спектрален цвят с бял цвят. Тя се дефинира като отношение на монохроматичния (еднороден) светлинен поток Φ_λ и сместването на монохроматичния светлинен поток със светлинния поток на белия цвят Φ_w :

$$s = \frac{\Phi_\lambda}{\Phi_\lambda + \Phi_w}. \quad (7.1)$$

За чист спектрален цвят наситеността е единица, а за чист бял цвят – нула. Наситеността на цветовете на реалните обекти обикновено се изразява с части от единицата (или в проценти). Колкото тя е по-близка до единица, толкова по-интензивно е изразено оцветяването на даден обект. Ако наситеността е малка, то светлостта е голяма, т.е. цветът на обекта е блед и неясно изразен.

Количеството на цвета (value) се характеризира със стойността на светлинния поток Φ или яркостта L на оцветяваното излъчване. Степента (нивото) на възбуждане на фоторецепторите на човешкото око е пропорционална на количеството на цвета.

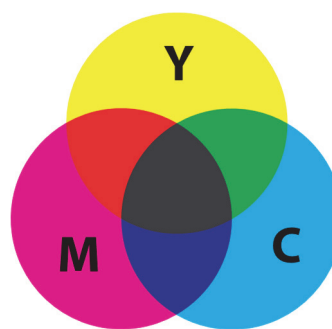
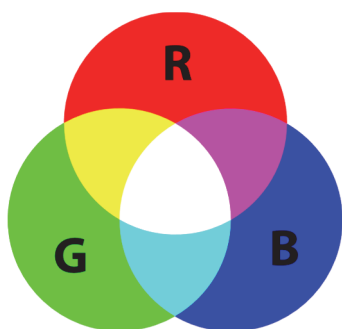
От изложеното по-горе следва, че цветът на всяко излъчване може да се разглежда като тримерна величина във функция от нюанса, наситеността и яркостта.

Белият цвят представлява композиция от различни цветове на видимия спектър. Обикновено като бяла се разглежда светлината на слънцето, електрическите лампи и др. Поради различната спектрална композиция, съществува видима разлика в цветностите им. Затова в колориметрията (наука за измерване на цветовете) са стандартизирани няколко източника с бяла светлина (виж т. 6.3) – CIE стандартни светлинни източници тип A, D65, B и C, които са с точно определени цветни характеристики [18,19,74].

Белият, сивият и черният цвят се наричат *ахроматични* или безцветни (неутрални), отличавайки се по своята светлост или яркост. Всички останали цветове се наричат *хроматични*. Обектите, отразяващи неселективно светлината, имат сив цвят. Колкото коефициентът на отражение ρ е по-малък, толкова сивият цвят е по-тъмен. При $\rho = 0$ цветът на обекта е черен; при $\rho = 1$ – бял [19].

6.2. Цветови модели. Цветова диаграма на CIE

В практиката се използват различни цветови модели, тъй като колориметрията обхваща широка област от различни приложения. Предназначението на цветовите модели е да направи възможно описанието на цветовете с помощта на определени стандарти. Цветовият модел дефинира определена координатна система и всяка една точка от пространството в тази система представлява конкретен цвят [3,22]. Цветовият модел задава съответствието между възприеманите от човека и запазени в паметта му цветове, и цветовете, формирани при определени условия на изходното устройство (монитор, дисплей и др.).



Фиг. 7.3а. Адитивен (RGB) модел Фиг. 7.3б. Субтрактивен (CMY) модел

Цветовите модели могат да се класифицират най-общо на адитивни и субтрактивни. При адитивния модел цветът се получава чрез добавяне на черно – използва се в моделите RGB (R-red (червено), G-green (зелено), B-blue (синьо) – фиг. 7.3а), HSV (H-hue (нюанс), S-saturation (наситеност), V-value (стойност) – фиг. 7.2) и др. Адитивният модел намира приложение в устройствата излъчващи светлина, като телевизори, монитори, дисплеи, проектори и др. При субтрактивния модел цветът се получава чрез „изваждане“ на цветове от бял лист – използва се в моделите CMY (фиг. 7.3б),

СМҮК (C-cyan (циан), M-magenta (пурпурночервено), Y-yellow (жълто), blacK (черно)) и др. Субтрактивният модел намира приложение в отразяващите светлина устройства, например принтери и др.

Цветовият модел $L^*a^*b^*$, въведен през 1976 г. от CIE, се използва за изчисляване на координатите на цветовото пространство Lab, където L е яркостта (ниво на светлост: $L = 100$ – бял цвят, $L = 0$ – черен), а хроматичните компоненти са означени като a и b (с преобладаващ червен цвят $a > 0$, с преобладаващ зелен – $a < 0$; с преобладаващ жълт цвят $b > 0$, с преобладаващ син – $b < 0$). Моделът $L^*a^*b^*$ е разновидност на моделите RGB и СМҮК, но надхвърля гамата от възприемани цветове. Цветовият модел $L^*a^*b^*$ има голямо приложение за оценяване на цветовете на различните промишлени продукти. Основното му предимство е независимост от устройствата за възпроизвеждане на цветовете (монитори) и от устройствата за въвеждане и извеждане на информация [3,22].

През 1931 г. Международната комисия по осветление въвежда цветовото пространство XYZ за количествено измерване на цветовете. Моделът CIE XYZ е еталон, който е определен строго математически и е образец за почти всички останали цветови модели, използвани в техниката. Цетовите стимули X , Y и Z се приемат за основни единични цветове. Те са въображаеми, несъществуващи в природата цветове, чиято наситеност е значително по-голяма от тази на спектралните цветове.

Цетовите стимули X , Y и Z се определят от следните изрази:

$$X = k_{\lambda} \sum_{i=1}^n S(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot \Delta\lambda; \quad (7.2)$$

$$Y = k_{\lambda} \sum_{i=1}^n S(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot \Delta\lambda; \quad (7.3)$$

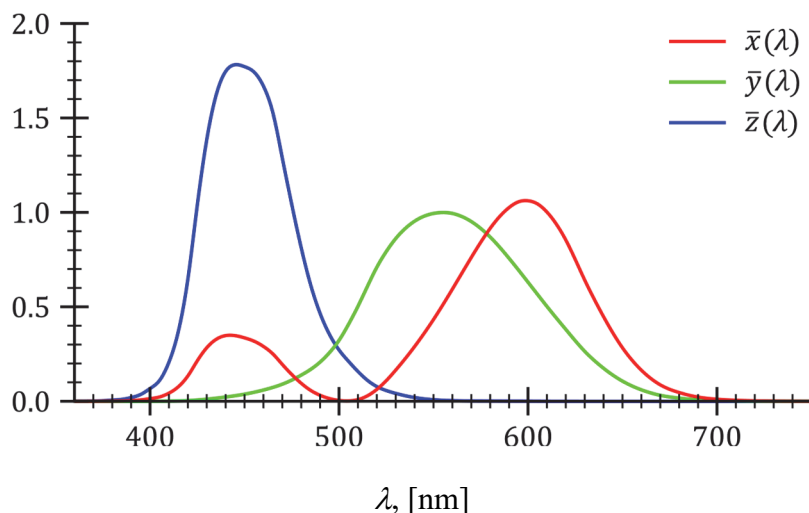
$$Z = k_{\lambda} \sum_{i=1}^n S(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot \Delta\lambda, \quad (7.4)$$

където: $S(\lambda)$ – относително спектрално разпределение на мощността на излъчване на CIE стандартен светлинен източник (A, C или D65); $\bar{x}$, $\bar{y}$ и $\bar{z}$ – специфични координати на цвета (фиг. 7.4), за които конусовидните фоторецептори на човешкото око са чувствителни; n – брой на интервалите, на които е разделена видимата част на спектъра – $\lambda = (380 \div 770)$ nm; k_{λ} – мащабен коефициент; $\Delta\lambda$ – спектрален интервал [27,41].

Координатите на цветността x и y на излъчването се определят от следните изрази [3,22,41]:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}; \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z}. \quad (7.5)$$

Цветовата диаграма на CIE от 1931 г., позната като CIE 1931 (x, y), е показана на фиг. 7.5а, от която се вижда, че в зависимост от координатите на цветността x и y може да се определи цветността на излъчването на един светлинен източник.



Фиг. 7.4. Специфични координати на цвета $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ и $\bar{z}(\lambda)$

Поради неравномерното разпределение на червените, зелените и сините зони в цветовата диаграма CIE 1931 и затруднението в различаване на разликата между два цвята, през 1960 г. е създадена показаната на фиг. 7.5б модифицирана цветова диаграма – CIE 1960 u, v , позната като CIE 1960 (u, v). В нея координатите на цветността x и y се трансформират в координати u и v , които се определят от x и y с изразите [27,81,82]:

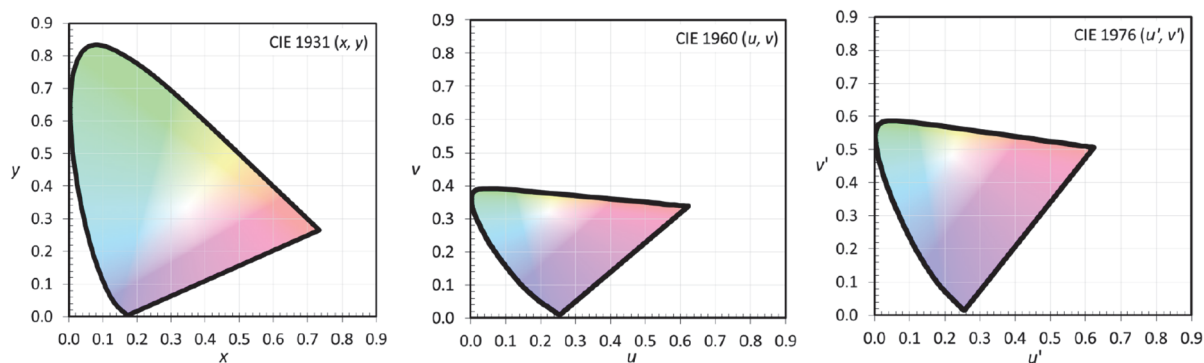
$$u = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}; \quad v = \frac{6y}{-2x + 12y + 3}. \quad (7.6)$$

През 1964 г. цветовата диаграма CIE 1960 (u, v) се трансформира в цветово пространство CIE 1964 (U^*, V^*, W^*), известно като CIEUVW. Компонентите U^* , V^* и W^* в цветовото пространство се използват за определяне на цветовите разлики ΔE_i без да се поддържа постоянна яркост [47,96].

През 1976 г. Международната комисия по осветление трансформира цветовия модел CIE XYZ в CIE 1976 UCS (uniform chromaticity scale diagram), познат като CIE 1976 (u', v') и показан на фиг. 7.5в. Моделът CIE 1976 (u', v') осигурява най-равномерно мащабиране в цветовото пространство с приблизително еднаква яркост [36,65]. Цветовите координати в модела u' и v' се определят от цветовите координати x и y с изразите:

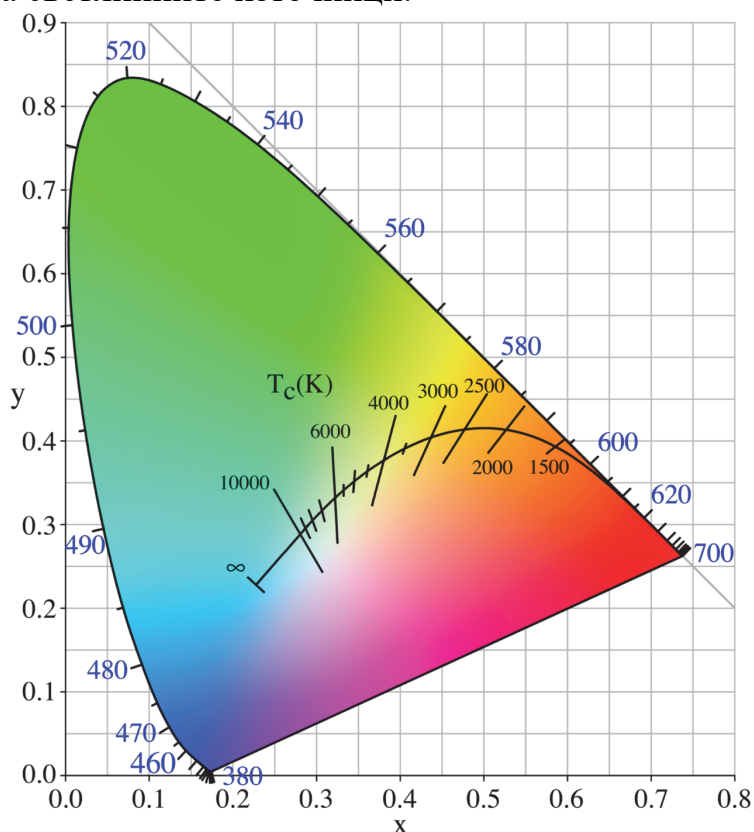
$$u' = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}; \quad v' = \frac{9y}{-2x + 12y + 3}. \quad (7.7)$$

От изрази (7.6) и (7.7) се вижда, че координатите u и u' от цветовите модели CIE 1960 (u,v) и CIE 1976 (u',v') са равни.



Фиг. 7.5а. CIE 1931 (x,y) Фиг. 7.5б. CIE 1960 (u,v) Фиг. 7.5в. CIE 1976 (u',v')
7.5. Цветови диаграми на CIE

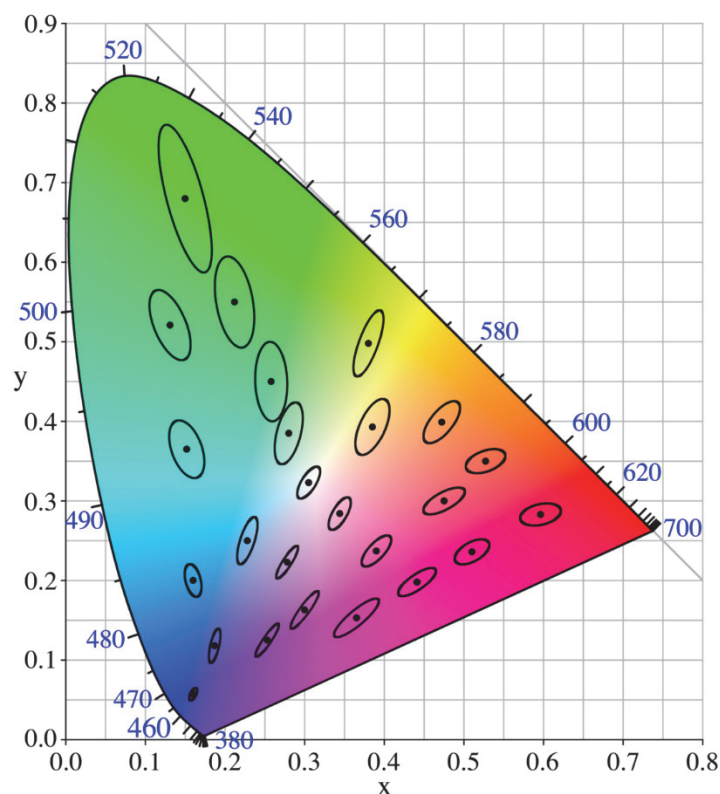
Черната крива в цветовата диаграма на CIE от 1931 г. (фиг. 7.6) представя геометрично място на точки, в които абсолютно черно тяло (АЧТ) излъчва с определена цветност, която се променя в зависимост от неговата температура. Тази крива се нарича locus на Планк или крива на цветна температура на абсолютно черно тяло [3,73,94]. В зависимост от координатите на цветността и локуса на Планк се определя цветната температура на излъчването на светлинните източници.



Фиг. 7.6. Цветова диаграма CIE 1931 (x,y) с locus на Планк

В цветовата диаграма CIE 1931 (x, y) видимата разлика между различните цветове се изобразява в диаграмата на Дейвид Макадам (David MacAdam), с т.нар. елипси на Макадам – фиг. 7.7. За по-добра визуализация, елипсите на Макадам са десет пъти по-големи от действителния си размер и се отнасят за централната част на зрителното поле ($\leq 2^\circ$)[3,78].

Диаграмата на Макадам първоначално е разчетена при фиксирана координата на яркостта $L = 48 \text{ cd/m}^2$. От диаграмата се вижда, че размерите на елипсите са различни в отделните ѝ участъци. При изменение на нивото на яркостта големината на елипсите по цветовите координатните оси x и y също се променя. За определени точки от цветовия график са начертани затворени криви с елиптична форма, които съответстват на изменението на цветността с еднакъв брой цветни прагове. Най-голям е цветният праг в областта на небесносините и зелените лъчи, а най-малък – във виолетово-пурпурната. Следователно разстоянието между две точки в цветовия график не може числено да характеризира цветовия контраст, тъй като то не е правопрпорционално на броя на цветовите прагове. В резултат на това през втората половина на XX в. няколко изследователи изработват варианти на диаграмата на Макадам за тримерното пространство, при което яркостната координата вече не е фиксирана, а приема набор от стойности в интервала – $L = (3 \div 30) \text{ cd/m}^2$. В новите тримерни пространства толерансите имат формата на елипсоиди и се описват с тензорни уравнения [3,19].



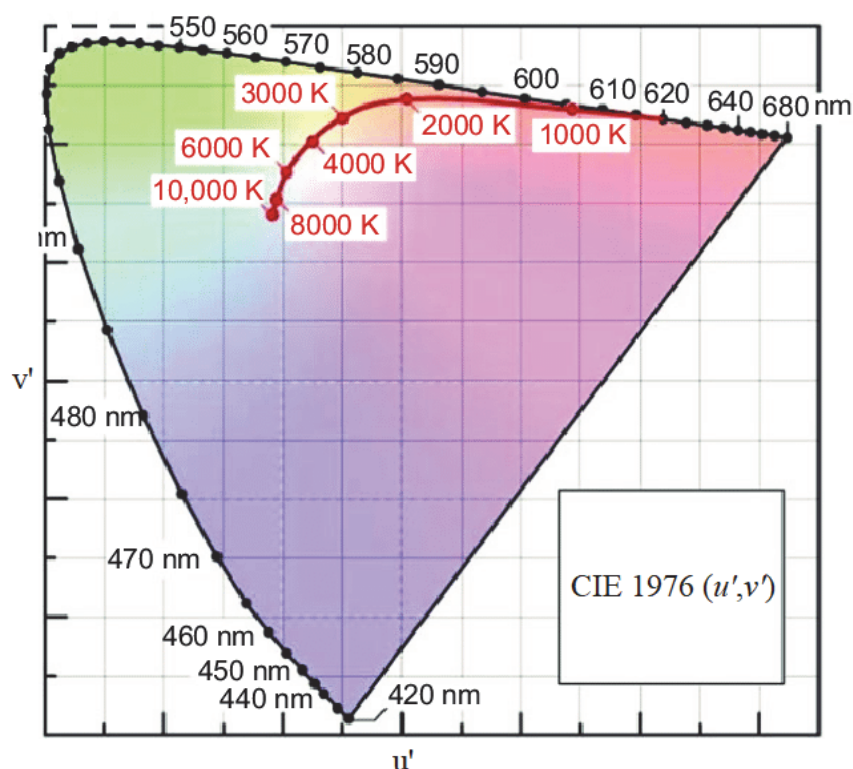
Фиг. 7.7. Диаграма на Макадам за определяне на допустимия толеранс на разликата между цветовете

6.3. Основни цветови характеристики на светлинните източници

Основните цветови характеристики на светлинните източници са цветна температура (или корелирана цветна температура) и индекс на цветоподаване.

а) Корелирана цветна температура

Ако координатите на цветността на светлинен източник с бяла светлина попадат в локуса на Планк (точките върху червената крива на фиг. 7.8), тогава температурата на излъчване на АЧТ има същите точки на цветност, както източника на бяла светлина и се нарича *цветна температура* (цветът на излъчената температура зависи единствено от температурата, до която е нагрят АЧТ). В случай, че координатите на цветността на изследвания светлинен източник не са в геометричното място на локуса на Планк, тогава температурата на излъчване на АЧТ, чиито координати на цветност (u', v') са най-близки до изследвания светлинен източник на бяла светлина, е определена като *корелирана цветна температура* T_{cp} , или най-близката температура на АЧТ, при която цветът на АЧТ е най-близък до цвета на този светлинен източник [70]. Често в технически данни на лампи се използва английската аббревиатура *CCT* (*Correlated Colour Temperature*).



Фиг. 7.8. Цветова диаграма CIE 1976 (u', v') с локус на Планк при различни температури на АЧТ

Цветната температура, респективно и корелираната цветна температура T_{cp} се измерват в Келвини [K].

Цветната температура може да се определи точно само за светлинните източници с непрекъснат спектър от топлинно излъчване, аналогичен на спектъра на АЧТ. Такива светлинни източници са нажежаемите и нажежаемите халогенни лампи, чиято цветна температура е много близка до действителната им работна температура. За тези лампи чрез цветната температура може да се определи спектралният състав на излъчването и възпроизвеждането на цвета [27,41,64,69].

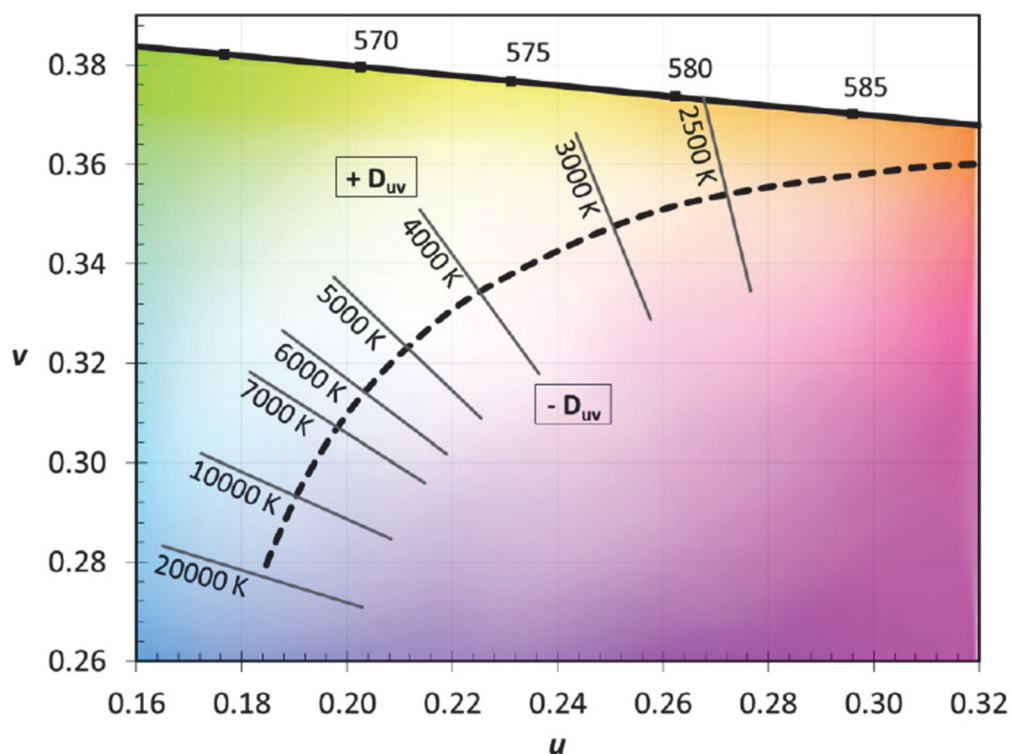
За светлинните източници работещи с луминесценция и линеен спектър, например разрядните лампи (луминесцентни, металхалогенни, натриеви и др.) и LED, хроматичните координати дефинират точки, които лежат извън локуса на Планк (червената линия от фиг. 7.8). За тези лампи цветната температура характеризира единствено възпроизвеждането на цвета на бялата светлина, но на практика не може да се съди за спектралния състав на излъчването [27,41,70].

В табл. 7.2 са показани координатите на цветност x и y и корелираната цветна температура T_{cp} на някои CIE стандартни източници при перфектно дифузно отразяваща повърхност за стандартен зрителен наблюдател при зрително поле 2° и 10° [22,48].

Табл. 7.2. Координати на цветност x, y и корелирана цветна температура T_{cp} на някои CIE стандартни източници

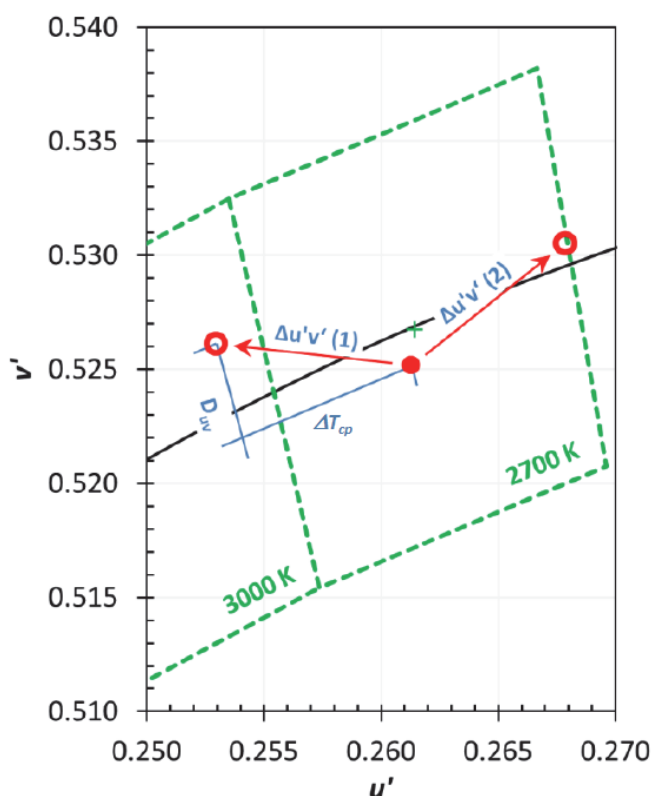
Тип на СИ по CIE	Координати на цветността x,y				T _{ср} , [K]	Наименование на СИ
	Зрително поле					
	CIE 1931 2°		CIE 1964 10°			
	x _{2°}	y _{2°}	x _{10°}	y _{10°}		
A	0,44758	0,40745	0,45117	0,40594	2 856	Нажежаема волфрамова лампа
B	0,34842	0,35161	0,3498	0,35270	4 874	Директно слънчева светлина на обяд
C	0,31006	0,31616	0,31039	0,31905	6 774	Дневна светлина Северно небе, средна
D50	0,34567	0,35850	0,34773	0,35952	5 003	Светлина на хоризонта
D55	0,33242	0,34743	0,33411	0,34877	5 503	Дневна светлина сутрин и следобед
D65	0,31272	0,32903	0,31382	0,33100	6 504	Дневна светлина по обед
D75	0,29902	0,31485	0,29968	0,31740	7 504	Дневна светлина на Северно небе
D93	0,28315	0,29711	0,28327	0,30043	9 305	Ефективни монитори със син фосфор
E	1/3	1/3	1/3	1/3	5 454	Равноквантов източник на светлина
F1	0,31310	0,33727	0,31811	0,33559	6 430	Дневна луминесцентна
F2	0,37208	0,37529	0,37925	0,36733	4 230	Студено-бяла луминесцентна
F3	0,40910	0,39430	0,41761	0,38324	3 450	Бяла луминесцентна
F4	0,44018	0,40329	0,44920	0,39074	2 940	Топло-бяла луминесцентна
F5	0,31379	0,34531	0,31975	0,34246	6 350	Дневна луминесцентна
F6	0,37790	0,38835	0,38660	0,37847	4 150	Бяла луминесцентна
F7	0,31292	0,32933	0,31569	0,32960	6 500	D65 – симулатор на дневна светлина
LED-B1	0,45600	0,40780			2 733	Луминофор за бяла светлина от син LED
LED-B2	0,43570	0,40120			2 998	Луминофор за бяла светлина от син LED
LED-B3	0,37560	0,37230			4 103	Луминофор за бяла светлина от син LED
LED-B4	0,34220	0,35020			5 109	Луминофор за бяла светлина от син LED
LED-B5	0,31180	0,32360			6 598	Луминофор за бяла светлина от син LED
LED-BH1	0,44740	0,40660			2 851	Луминофор от смес на син и червен LED
LED-RBG1	0,45570	0,42110			2 840	Смес от червен (R), зелен (G) и син (B) LED
LED-V1	0,45600	0,45480			2 724	Луминофор за бяла светлина от виолетов LED
LED-V2	0,37810	0,37750			4 070	Луминофор за бяла светлина от виолетов LED

Линиите с постоянна корелирана цветна температура в диаграмата CIE 1960 (u, v) на фиг. 7.9 са перпендикулярни на локуса на Планк (черната прекъсната крива) и показват, че светлинните източници може да имат една и съща корелирана цветна температура (ако цветовете координати попадат в тези линии), но различен нюанс на бялата светлина.



Фиг. 7.9. Линии с постоянна корелирана цветна температура и определяне на цветовата разлика D_{uv} в CIE 1960 (u, v)

За оценка на отклонението на координатите на цветността спрямо локуса на Планк при една и съща корелирана цветна температура T_{cp} се въвежда показателят цветова (хроматична) разлика D_{uv} . Хроматичната разлика може да бъде положителна или отрицателна. Отрицателна е стойността ($-D_{uv}$), когато координатите на цветност по линията с постоянна T_{cp} са под локуса на Планк – нюансът на бялата светлина е лилаво-червен. Положителна е стойността ($+D_{uv}$), когато координатите на цветност по линията с постоянна T_{cp} са над локуса на Планк – нюансът на бялата светлина е зелен или жълт. Допустимите стойности на хроматична разлика D_{uv} за бяла светлина зависят от начина на тяхното определяне – вида на цветовата диаграма и елипсите на Макадам, и са посочени в [42]. Показателят D_{uv} има важно значение при точното определяне и поддържане на нюансите на цвета на светлината – например във филмите, фотографията, изложбени зали и др. [82].

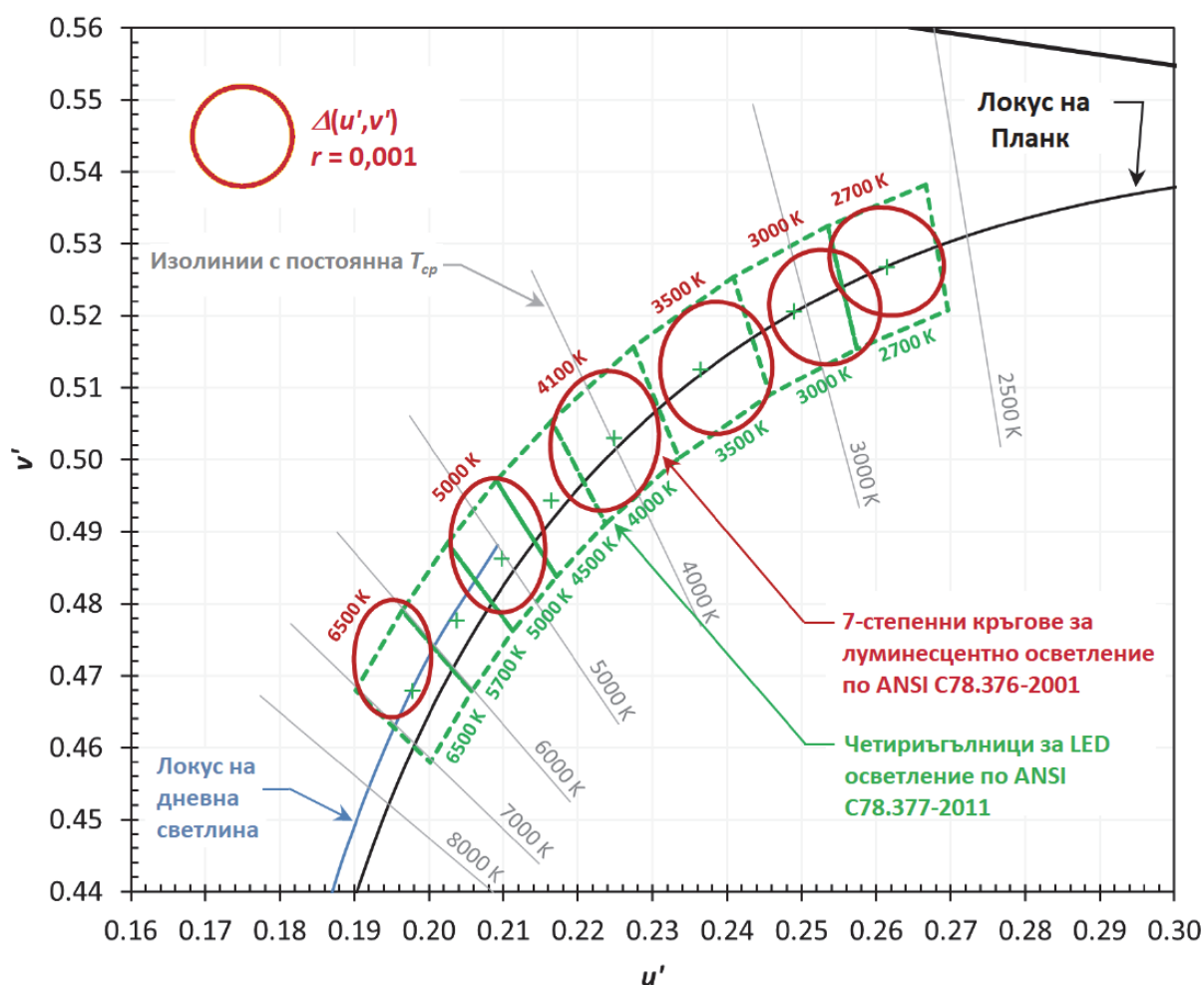


Фиг. 7.10. Разлика между показателите D_{uv} и $\Delta u'v'$

В цветовата диаграма CIE 1976 (u', v') на фиг. 7.10 в близък план е показан физическият смисъл между цветовата разлика D_{uv} и промяната на еднородността на цвета $\Delta u'v'$. Показателят D_{uv} се проявява при постоянна корелирана цветна температура T_{cp} на светлинния източник, докато показателят $\Delta u'v'$ е свързан с промяна на координатите на цветност при различна T_{cp} . Промяната на еднородността на цвета $\Delta u'v'$ описва общата цветова разлика, която може да се наблюдава, но не описва посоката на промяната, например $\Delta u'v'(1)$ и $\Delta u'v'(2)$ на фиг. 7.10 имат една и съща стойност, но се изместват в различни посоки [82].

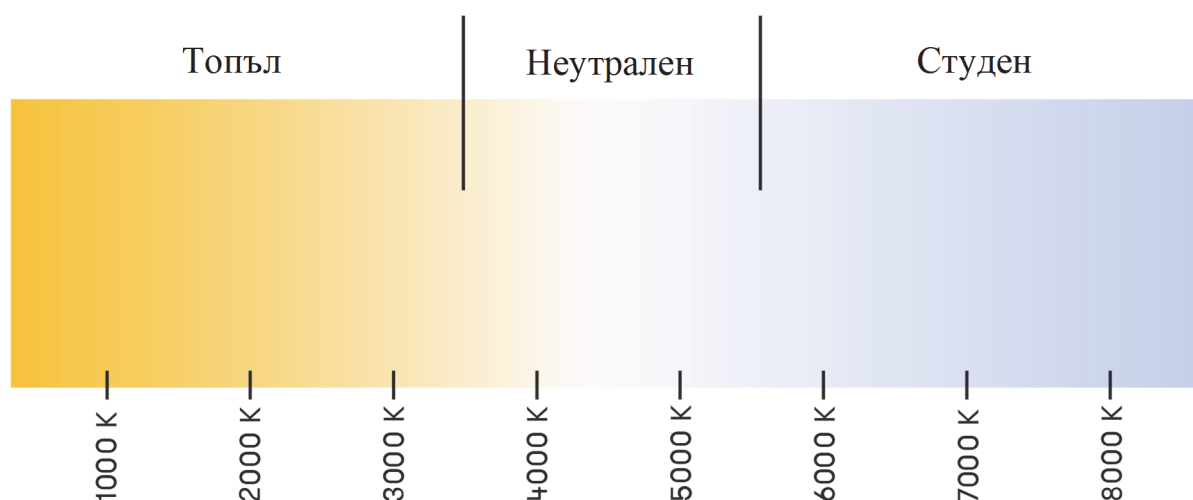
Съществуват различни методи за изчисляване на корелираната цветна температура в зависимост от вида на цветовата диаграма и координатите на цветност. Препоръчително е корелираната цветна температура да се изчислява при $\Delta u'v' \leq 0,05$ [17,69].

За оценка на еднородността на цветността на светлинните източници и промяната ѝ във времето се използват елипсите на Макадам. Размерът и формата на елипсите на Макадам в двете цветови диаграми – CIE 1931 (x, y) и CIE 1976 (u', v'), са различни. С развитието на електрическото осветление през годините се създава необходимост по други методи да се определят разликите и нееднородността на цвета, а елипсите на Макадам вече не са удобни за използване. При луминесцентното осветление елипсите на Макадам в цветовата диаграма CIE 1931 (x, y) (фиг. 7.7) са променени в кръгообразна форма в цветовата диаграма CIE 1976 (u', v'). С кръговете (с радиус $r = 0,001$) се осигурява по-добро покритие в зоната на бялата светлина в близост до локуса на Планк и по-добра оценка на цветовата разлика $\Delta(u', v')$ за 6 номинални стойности на корелираната цветна температура, както е показано с червен цвят на фиг. 7.11. При светодиодното (LED) осветление вместо кръгове, в цветовата диаграма CIE 1976 (u', v') се използват четириъгълници за 8 номинални стойности на корелираната цветна температура, както е показано със зелен цвят на фиг. 7.11 [17,22,42,82].



Фиг. 7.11. Допустими отклонения на цветността за луминесцентни и LED източници в диаграмата CIE 1976 (u', v')

В зависимост от корелираната цветна температура T_{cp} на светлинните източници, те се разделят на три групи на възпроизвеждане на цвета, показани на фиг. 7.12 и табл. 7.3 [27,41].

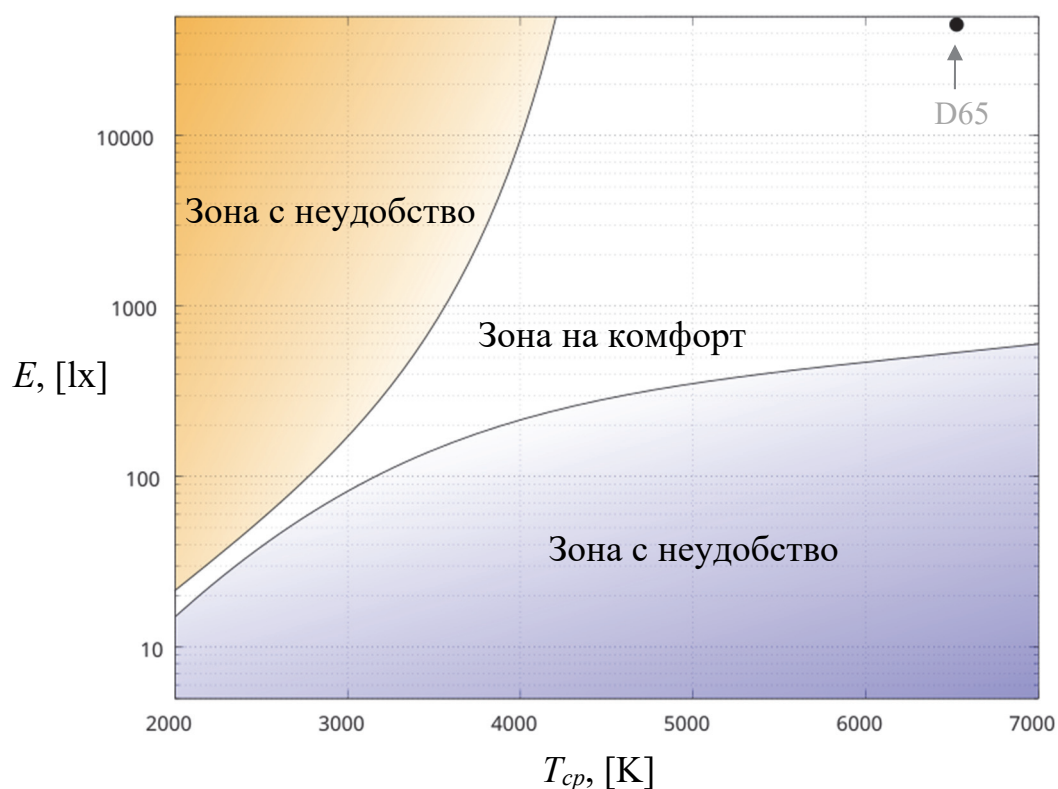


Фиг. 7.12. Цвят на бялата светлина

Табл. 7.3. Групи на възпроизвеждане на цвета на светлинни източници

Група	Цвят на бяла светлина	T_{cp} , [K]	Препоръки за използване
1	Топъл	$< 3\,000$	Ниски нива на осветеност, жилищни сгради, области със студен климат
2	Неутрален	$3\,300 \div 5\,300$	Работни помещения
3	Студен	$> 5\,300$	Високи нива на осветеност, специални зрителни задачи, области с топъл климат

Възпроизвеждането на цвета влияе върху впечатлението за околната среда, чувството за комфорт и работоспособността. Съществува зависимост между нивото на осветеност E и корелираната цветна температура T_{cp} , свързана с чувството за комфорт. Зависимостта е известна като диаграмата на Круитхоф (фиг. 7.13). Ниската корелирана цветна температура и високата осветеност предизвикват впечатление за неестествена околна среда и пренастищане с цветове; високата корелирана цветна температура и ниската осветеност – впечатление за студено и затъмнено околнo пространство [27,94].



Фиг. 7.13. Диаграма на Круитхоф

б) Индекс на цвето предаване

Цвето предаването на даден светлинен източник се изразява от степента на вярно възпроизвеждане на цветовете на обекти с различен цвят при сравнение на възприемането им при осветяване с него и с еталонен светлинен източник. Количествената оценка на цвето предаването на обек-

тите при осветяването им с различни източници се извършва с *общия индекс на цветопрераждане* R_a (в практиката се използва и аббревиатурата CRI от *Colour Rendering Index*) за осем изследвани стандартни цветни образци (TCS – test colour samples) с известен коефициент на дифузно отражение, за всеки от които се определя *частен индекс на цветопрераждане* R_i :

$$R_i = 100 - \Delta E_i, \quad (7.8)$$

където ΔE_i са цветовите разлики, получени при последователно осветяване на стандартните цветни образци с изследвания и еталонния светлинен източник [41,47,48].

Цветовите разлики ΔE_i за всеки от изследваните цветни образци i , осветявани последователно с изследвания и еталонния източник, се определят на базата на компонентите U^* , V^* и W^* от цветовото пространство CIE 1964 (U^*, V^*, W^*) и се изчисляват с израз:

$$\Delta E_i = \sqrt{(U^*_{r,i} - U^*_{k,i})^2 + (V^*_{r,i} - V^*_{k,i})^2 + (W^*_{r,i} - W^*_{k,i})^2}, \quad (7.9)$$

където индексите „ r “ и „ k “ на компонентите U^* , V^* и W^* са съответно за еталонния и изследвания източник при осветяване на стандартните цветни образци; U^* , V^* са компонентите на цветовото пространство; W^* – индекс на светлост (lightness index) [96].

Компонентите U^* , V^* и W^* се определят с изразите:

$$W^*_{r,i} = 25(Y_{r,i})^{1/3} - 17; \quad (7.10)$$

$$U^*_{r,i} = 13W^*_{r,i}(u_{r,i} - u_r); \quad (7.11)$$

$$V^*_{r,i} = 13W^*_{r,i}(v_{r,i} - v_r); \quad (7.12)$$

$$W^*_{k,i} = 25(Y_{k,i})^{1/3} - 17; \quad (7.13)$$

$$U^*_{k,i} = 13W^*_{k,i}(u'_{k,i} - u'_k); \quad (7.14)$$

$$V^*_{k,i} = 13W^*_{k,i}(v'_{k,i} - v'_k), \quad (7.15)$$

където: $u'_k = u_r$, $v'_k = v_r$ са цветовите координати, получени при последователното осветяване на стандартните цветни образци с изследвания и еталонния източник; стойностите $Y_{r,i}$ и $Y_{k,i}$ трябва да бъдат нормализирани, така че $Y_r = Y_k = 100$ [47].

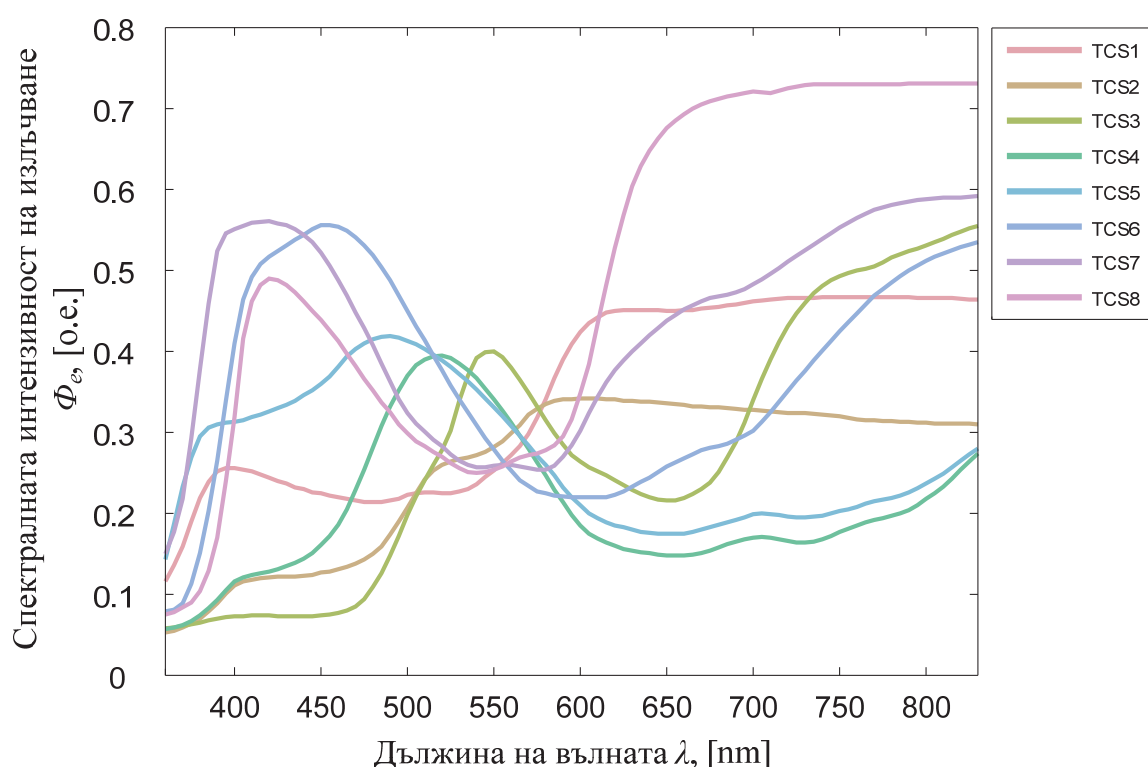
Индексът на цветопрераждане на даден светлинен източник се измерва и определя в следния ред:

- 1) измерва се спектъра и се определят цветовите координати и корелираната цветна температура на изследвания светлинен източник;
- 2) избира се стандартен източник на излъчване, който е най-близък по цветна температура до изследвания;
- 3) за всеки i -ти стандартен цветен образец се изчислява цветовата разлика ΔE_i по формула (7.9);
- 4) за всеки i -ти стандартен цветен образец се определя частният индекс на цветопрераждане R_i по формула (7.8);
- 5) изчислява се общият индекс на цветопрераждане R_a , като изчислените частни индекси R_i се заместят във формулата [3,47]:

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i. \quad (7.16)$$

Общият индекс на цветопрераждане се изменя от 0 до 100. За еталонен източник R_a е максимален ($R_a = 100$), тъй като цветовата разлика $\Delta E = 0$. Колкото по-малка е цветовата разлика между еталонния и изследвания източник, толкова по-добро е цветопрераждането.

Спектралната интензивност на излъчване на осемте стандартни цветни образци е показана на фиг. 7.14 [101].



Фиг. 7.14. Спектралната интензивност на излъчване на стандартни цветни образци

По препоръки на CIE от 1995 г. броят на изследваните стандартни цветни образци се увеличава на 14. Въпреки това, японски изследователи считат, че 14-те стандартни цветни образци не са достатъчни за да може светлинните източници точно да възпроизвеждат цвета на човешката кожа. Затова изследователите разработват нов стандартен цветен образец (TCS15), в резултат на което броят на стандартните цветни образци се увеличава на 15 (табл. 7.4).

Табл. 7.4. Стандартни цветни образци за определяне на цветопрдаване

R1 светло сивкаво- червено (TCS01)	R2 тъмно сивкаво- жълто (TCS02)	R3 наситено жълто- зелено (TCS03)	R4 жълтеникаво- зелено (TCS04)	R5 светло синкаво- зелено (TCS05)
R6 светло синьо (TCS06)	R7 светло виолетово (TCS07)	R8 светло червеника- во-пурпурно (TCS08)	R9 наситено червено (TCS09)	R10 наситено жълто (TCS10)
R11 наситено зелено (TCS11)	R12 наситено синьо (TCS12)	R13 светло жълтени- каво-розово (TCS13)	R14 маслинено-зелено (TCS14)	R15 кожа на азиатец (TCS15)

В резултат на увеличения брой на стандартните цветни образци, от израз (7.16) се получават варианти на индекс на цветопрдаване:

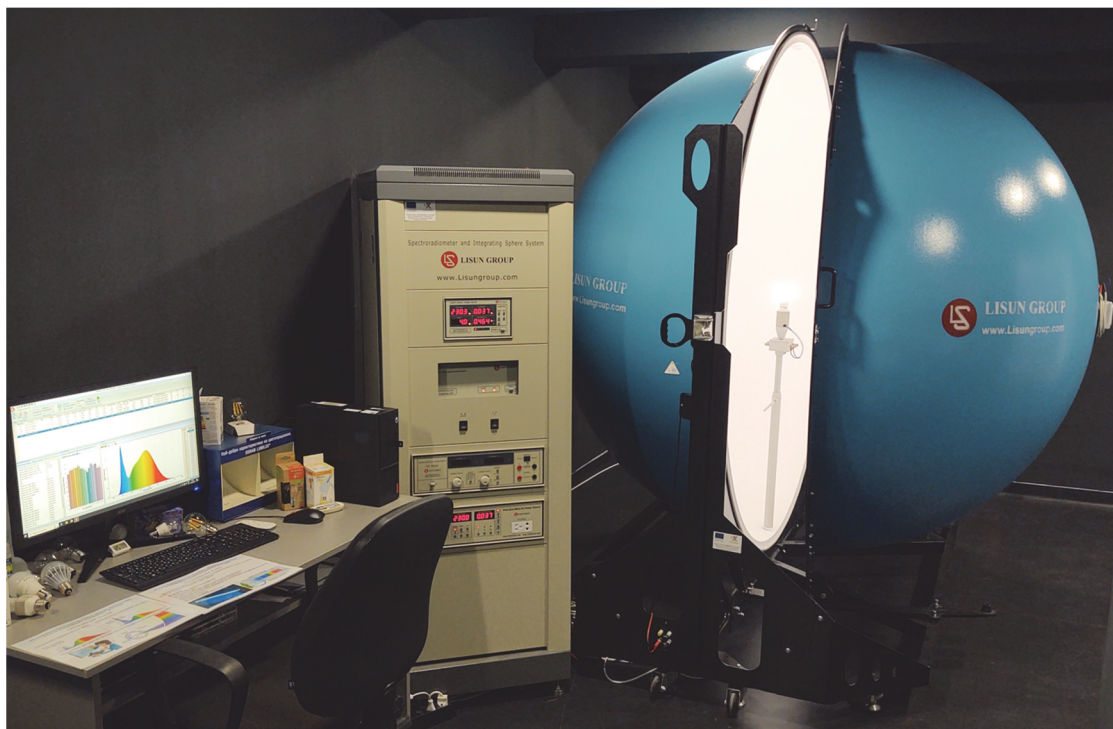
- за 14 стандартни цветни образци:

$$R_a = \frac{1}{14} \sum_{i=1}^{14} R_i, \quad (7.17)$$

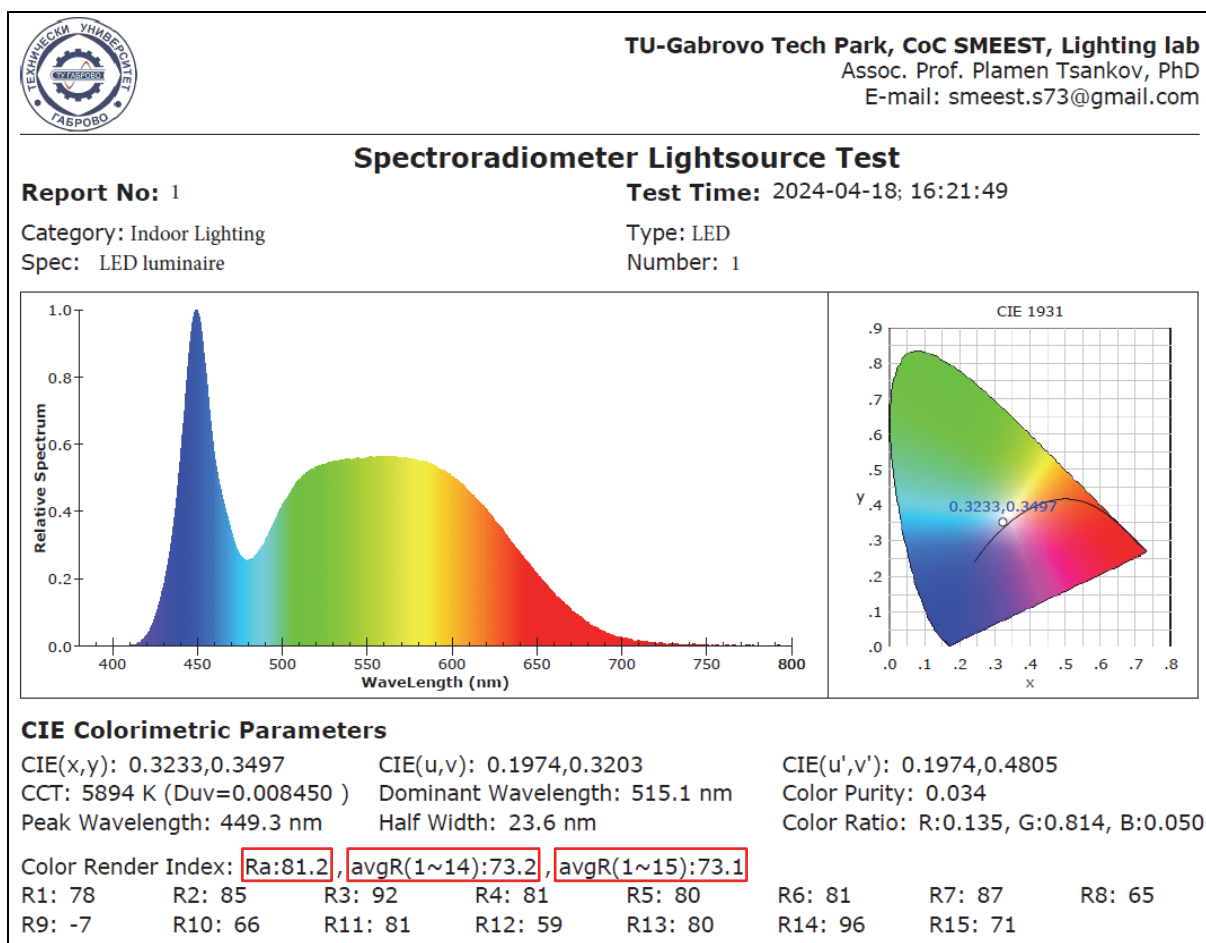
- за 15 стандартни цветни образци:

$$R_a = \frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} R_i. \quad (7.18)$$

Стандартните цветови образци се контролират при измерване на цвятните характеристики на светлинните източници. Съвременните спектро-радиометри (фиг. 7.15), с които се измерва спектралният състав и цветовите характеристики на светлинните източници, показват различни стойности на общия индекс на цветопрдаване R_a , когато се изчислява по една от трите формули (7.16), (7.17) и (7.18).

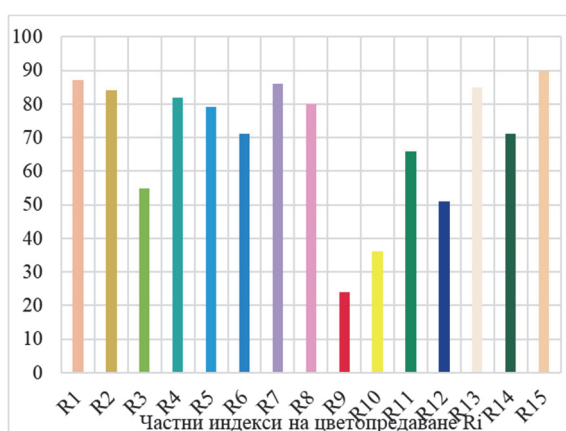


Фиг. 7.15. Измервателна система със спектрорадиометър за измерване на цетови характеристики на светлинни източници

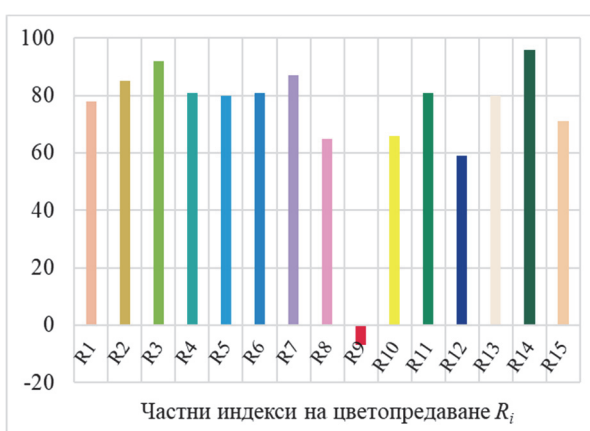


Фиг. 7.16. Протокол от измерване на цетови характеристики на СИ

На фиг. 7.16 е показана част от примерен протокол от лабораторно измерване на цветови характеристики на светодиоден осветител, за който са изчислени стойностите на R_i за 15 стандартни цветни образци. Общият индекс на цветопрераждане за първите 8 цветни образци е $R_a = 81,2$, за 14-те образци – $R_a = 73,2$, за 15-те образци – $R_a = 73,1$. Вижда се, че има разлика в стойността на R_a – по-ниски са изчислените стойности при по-големия брой стандартни цветни образци. С увеличаване на броя на стандартните цветни образци R_a намалява, тъй като се обхващат образци, отразяващи цветовете в края на спектъра, който има минимална интензивност. Препоръчва се да има техническа информация за частния индекс R_9 (наситено червено), тъй като той е много нисък за много от съвременните осветители с луминесцентни и светодиодни лампи (фиг. 7.17).



Фиг. 7.17а. Измерени R_i за луминесцентен осветител



Фиг. 7.17б. Измерени R_i за светодиоден осветител

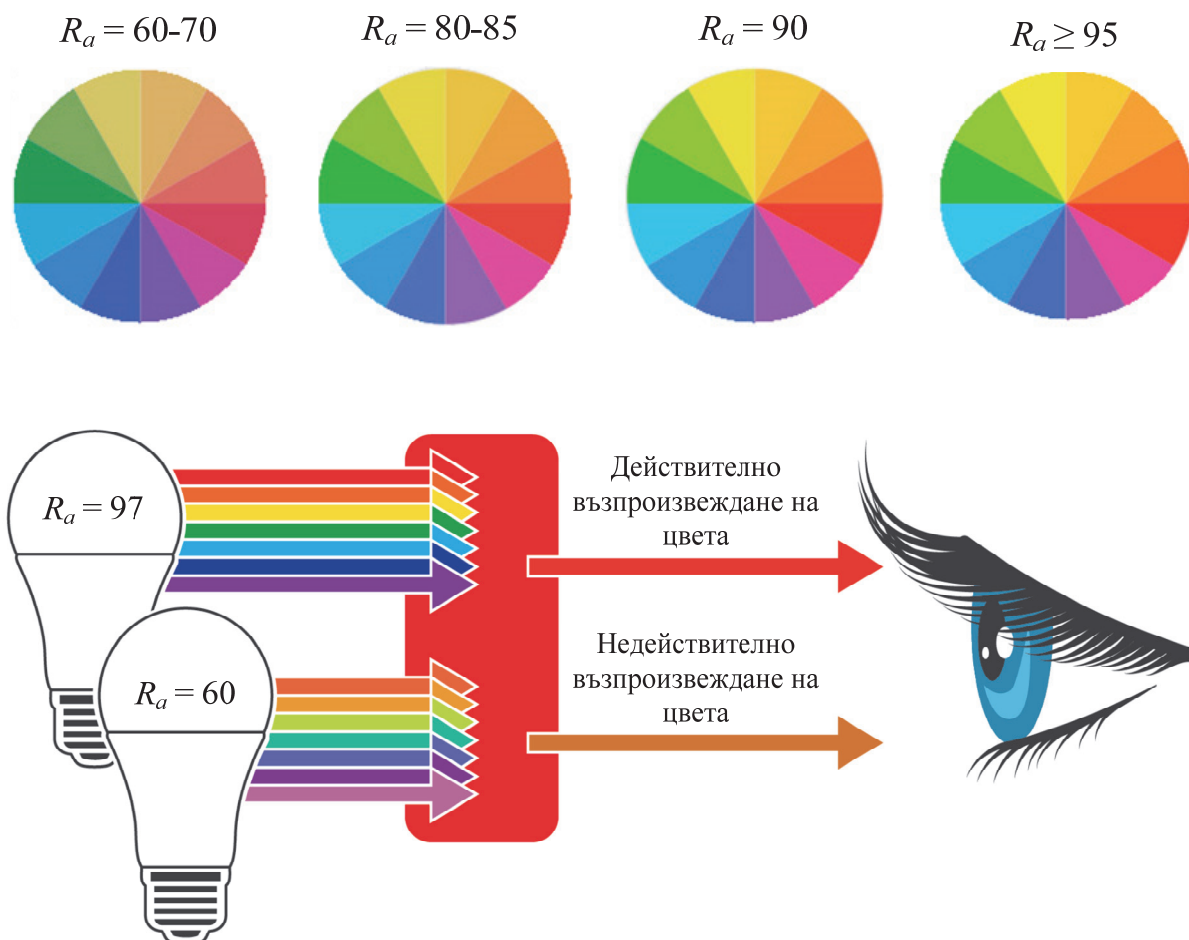
В зависимост от стойността на индекса на цветопрераждане R_a на светлинните източници са възприети пет групи (степени) на цветопрераждане, представени в табл. 7.5 [20,27,41].

Табл. 7.5. Групи на цветопрераждане на светлинните източници

Група на цветопрераждане	Индекс на цветопрераждане	Приложение
1А	$R_a \geq 90$	Контрол на цветовете, клинични изпитвания
1В	$90 > R_a \geq 80$	Зони с продължителна зрителна дейност: жилища, офиси, училища, магазини, болници
2	$80 > R_a \geq 60$	Тъкване, плетене, дървообработване
3	$60 > R_a \geq 40$	Тежка промишленост, зони за движения, коридори
4	$40 > R_a \geq 20$	Места без изисквания за разпознаване на цветовете

Индексът на цветопрераждане има съществено значение за здравето и работоспособността на човека. Затова той се посочва в нормативните документи за изкуствено осветление на работни места на закрито, заедно с

корелираната цветна температура и осветеността. Източници с високо цветопрераждане и цветност, близка до тази на бялата светлина, повишават тонуса и зрителната работоспособност на хората, докато при светлинни източници с лош (нисък) индекс на цветопрераждане се увеличава бързо зрителната умора и може да причини астигматизъм (вид аберация) и да се разстрои акомодационната способност на окото (фиг. 7.18) [3,8].



Фиг. 7.18. Различно възпроизвеждане на цвета от светлинни източници

В зоните с продължителна зрителна дейност общият индекс на цветопрераждане трябва да бъде $R_a \geq 80$ [8].

Индексът на цветопрераждане R_a има някои ограничения:

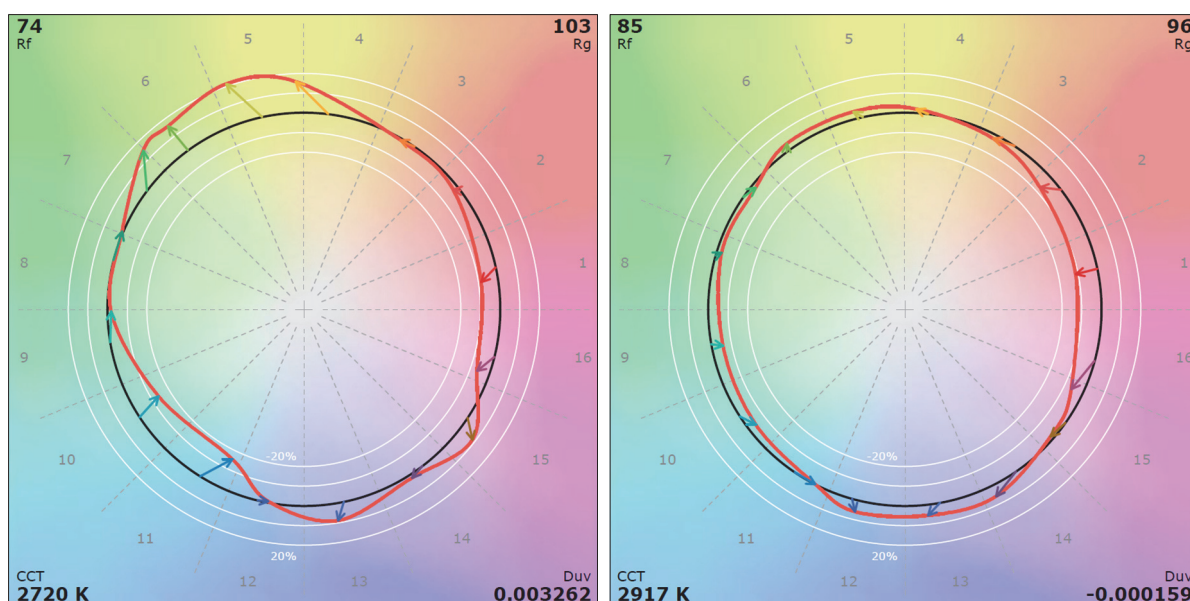
- по стандарт оценява само 8 стандартни цветни образци (15 в разширен диапазон);
- два светлинни източника могат да имат един и същ R_a , но да възпроизвеждат цветовете по различен начин.

Алтернатива на индекса на цветопрераждане е скалата за качество на цвета Q_a (Color Quality Scale), разработена от Националния институт за стандарти и технологии (САЩ). Тя оценява по-детайлно възпроизвеждане-

то на цвета на 15 силно наситени цветови проби и е предназначена за оценка на цвето предаването на съвременни светодиодни източници, имащи по-фина разделителна способност.

За по-задълбочено разглеждане на динамиката на цвето предаването на съвременните светодиодни осветители може да се използват показателите на стандарта ANSI/IES TM-30 (САЩ), който има следните предимства [43]:

- използва 99 вместо 15 стандартни цветни образци;
- въвежда допълнителни индекси – *вярност на цвета* R_f (Fidelity Index) (изменя се от 0 до 100) и *индекс на наситеност* R_g (Gamut Index) (при $R_g < 100$ – изследваният светлинен източник възпроизвежда цветовете с по-малка наситеност от еталонния; при $R_g > 100$ – изследваният източник възпроизвежда цветовете с по-голяма наситеност от еталонния), за по-детайлно представяне на цвето предаването;
- използва *цветна векторна графика* за сравнително визуално представяне на промените в нюанса и наситеността при осветяване на повърхностите на обектите от изследван и еталонен светлинен източник.



а) Луминесцентен осветител

б) Светодиоден осветител

Фиг. 7.19. Цветна векторна графика на светлинни източници по стандарт ANSI/IES TM-30

Показателите Q_a , R_f и R_g се изчисляват и визуализират при измерване спектралното разпределение и определяне на цветовете характеристики на светлинните източници с по-съвременните спектрорадиометри. На фиг. 7.19 са показани измерени със спектрорадиометъра от фиг. 7.15 цветна векторна графика, индекс на вярност на цвета R_f и индекс на наситеност R_g за луминесцентен (7.19а) и светодиоден (7.19б) осветител.

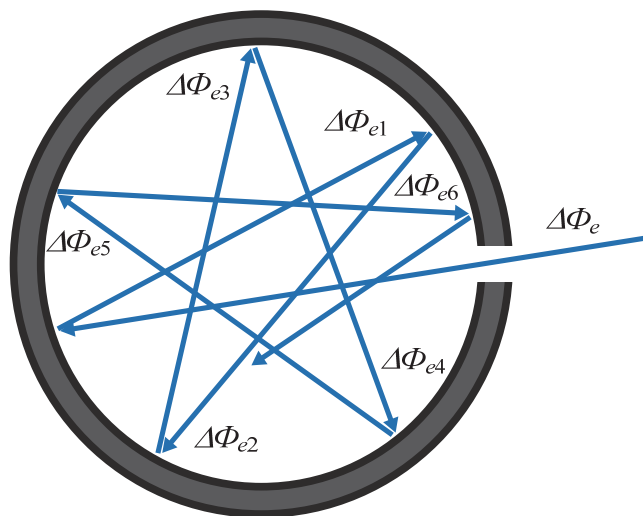
8. ОСНОВНИ ЗАКОНИ НА ТОПЛИННОТО ИЗЛЪЧВАНЕ. ЕФЕКТИВНОСТ НА ТОПЛИННОТО ИЗЛЪЧВАНЕ. ЛУМИНЕСЦЕНТНО ИЗЛЪЧВАНЕ

8.1. Теория на топлинното излъчване. Основни закони на топлинното излъчване

Всяко тяло излъчва в околното пространство, ако неговата температура е по-голяма от абсолютната нула ($T > 0$). Излъчването е продължително, ако тялото получава непрекъснато енергия отвън или за сметка на химични процеси, извършващи се в него, при което се намалява постепенно неговата вътрешна енергия. Излъчването се нарича топлинно, когато източникът на излъчване е топлинната енергия на тялото. То се определя от непрекъснатото и кинетично въртливо, колебателно и постъпателно движение на молекулите на излъчващото тяло. Температурата е основна характеристика на топлинния излъчвател. С увеличаване на температурата се увеличава и интензивността на излъчването. При изменение на температурата се променя и спектърът на излъчването.

Плътността на излъчване за различните тела, имащи една и съща температура, може да бъде различна, ако коефициентите им на поглъщане не са еднакви. В зависимост от поглъщателните и излъчвателните способности телата се разделят на три групи: абсолютно черни, сиви и избирателни (селективни).

За анализ на топлинното излъчване се използва т.нар. абсолютно черно тяло (АЧТ), което поглъща изцяло падащата върху него енергия и притежава коефициент на поглъщане $\alpha = 1$. То представлява идеализиран топлинен излъчвател, който при равни други условия създава най-голям в сравнение с другите излъчватели поток на излъчване [19,21], който зависи само от собствената му температура. На фиг. 8.1 е показан схематично модел на АЧТ.



Фиг. 8.1. Модел на абсолютно черно тяло

Вътрешната повърхност на обемното тяло е боядисана в черно. Лъчистият поток $\Delta\Phi_e$, който влиза през направения малък отвор, се поглъща напълно в резултат на многократните вътрешни отражения. Ако това тяло бъде нагрето, то ще излъчва през отвора като абсолютно черно тяло.

Реалните сиви и избирателно излъчващи тела имат коефициенти на поглъщане $\alpha < 1$.

Основните закони на топлинното излъчване са формирани за абсолютно черно тяло.

- *Закон на Кирхоф*

През 1859 г. Кирхоф установява количествена зависимост между плътността на излъчване и интегралните коефициенти на поглъщане на различни тела, които имат еднаква температура:

$$\frac{R_1}{\alpha_1} = \frac{R_2}{\alpha_2} = \dots = \frac{R_n}{\alpha_n} = R_s, \quad (8.1)$$

където: $R_s, R_1, \dots, R_n$ – плътности на излъчване на АЧТ и на реалните тела, които имат еднаква температура; $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ – коефициенти на поглъщане на реалните тела при температура T .

За еднородни лъчисти потоци законът на Кирхоф има следния вид:

$$\frac{r_1}{\alpha_1} = \frac{r_2}{\alpha_2} = \dots = \frac{r_n}{\alpha_n} = r_s, \quad (8.2)$$

където: $r_s, r_1, \dots, r_n$ – са спектралните интензивности на плътността на излъчване на АЧТ и на реалните излъчватели за определени стойности на дължината на вълната λ и температурата T ; $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ – спектрални коефициенти на поглъщане на излъчвателите при същите стойности на λ и T .

От изрази (8.1) и (8.2) могат да се направят следните изводи:

- при еднаква температура плътността на излъчване на всички реални тела е по-малка от тази на АЧТ;

- спектралната интензивност на плътността на излъчване на реалните тела във всяка област от спектъра е винаги по-малка от спектралната интензивност на плътността на излъчване на АЧТ при еднаква температура.

- *Закон на Стефан – Болцман*

Законът на Стефан – Болцман дава връзката между плътността на излъчване на абсолютно черно тяло $R_s(T)$ и неговата температура T . Зависимостта е установена експериментално от Стефан, а теоретично доказана от Болцман [19]. Законът гласи, че плътността на излъчване е пропорционална на четвъртата степен на температурата на абсолютно черното тяло и се изразява с уравнението:

$$R_s(T) = \sigma T^4, \quad (8.3)$$

където $\sigma = 5,672 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ – константа на пропорционалност, наречена константа на Стефан – Болцман.

- *Закон на Планк*

Законът на Планк определя разпределението на енергията в спектъра на топлинното излъчване на АЧТ като функция от дължината на вълната [19,22]. Той извежда следната количествена зависимост между спектралната интензивност на плътността на излъчването, дължината на вълната и температурата на абсолютно черното тяло:

$$r_s(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1}, \quad (8.4)$$

където: r_s – спектрална интензивност на плътността на излъчването, в $[\text{Wm}^{-3}]$; λ – дължина на вълната, в $[\text{m}]$; e – основа на натуралния логаритъм; $c_1 = 2\pi h c^2 = 5,944 \cdot 10^{-17} \text{ Wm}^2$ – първа константа на лъчението; $c_2 = hc/k = 1,439 \cdot 10^{-2} \text{ mK}$ – втора константа; $h = 6,62607015 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ – константа на Планк; $c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$ – скорост на разпространение на светлината във вакуум; $k = 1,380649 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ – константа на Болцман.

Формулата на Планк е валидна за целия спектър на излъчването. Резултатите, които се получават от нея, се съгласуват с експерименталните данни за всички дължини на вълната. Само в зоната на ултравиолетовите (UV) и видимите излъчвания с известно приближение може да се използва по-простата формула, предложена от Вин:

$$r_s(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}}. \quad (8.5)$$

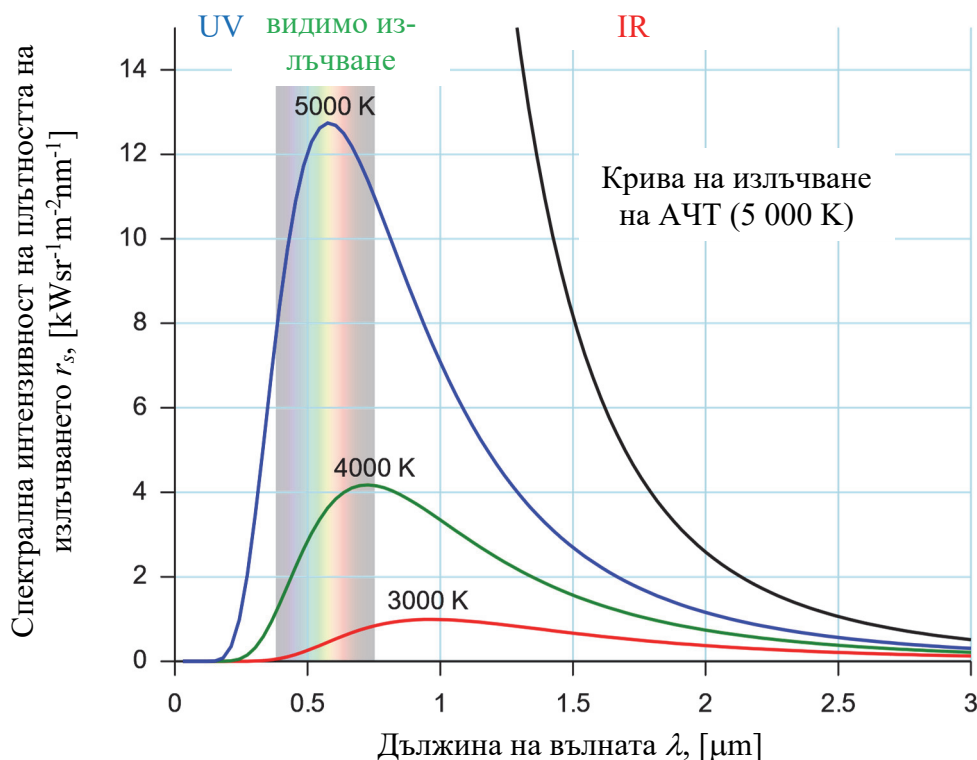
На фиг. 8.2 са построени кривите $r_s = f(\lambda)$ по уравнението на Планк (8.4) за различни стойности на абсолютната температура T [19,99].

От кривите се вижда, че при ниски температури излъчването на АЧТ е изцяло в инфрачервената зона на спектъра. С увеличаването на температурата бързо се повишава максимума на кривите, като едновременно той се измества в зоната на по-късовълновите излъчвания.

- *Закон на Вин*

След диференциране на уравнение (8.4) и като се приравни първата производна на нула, се получава:

$$\lambda_{\max} T \approx 2896 \text{ } \mu\text{mK} = \text{const.} \quad (8.6)$$



Фиг. 8.2. Спектрална интензивност на плътността на излъчването на АЧТ при различни температури

Израз (8.6) е известен като закон на Вин, който за пръв път е установен от него опитно.

От законите на Вин, Планк и Стефан – Болцман непосредствено следват следните съществени за осветителната техника изводи:

1) При повишаване температурата на излъчващото тяло рязко се увеличава неговият лъчист поток, като едновременно с това се изменя спектърът му (фиг. 8.2).

2) Когато се увеличава температурата, максимумът на спектралната интензивност на плътността на излъчване се измества към по-късите вълни. Ако температурата на излъчвателя е в интервала $T = (4\,670 \div 10\,000)$ K, максимумът е разположен в зоната на видимото излъчване (фиг. 8.2).

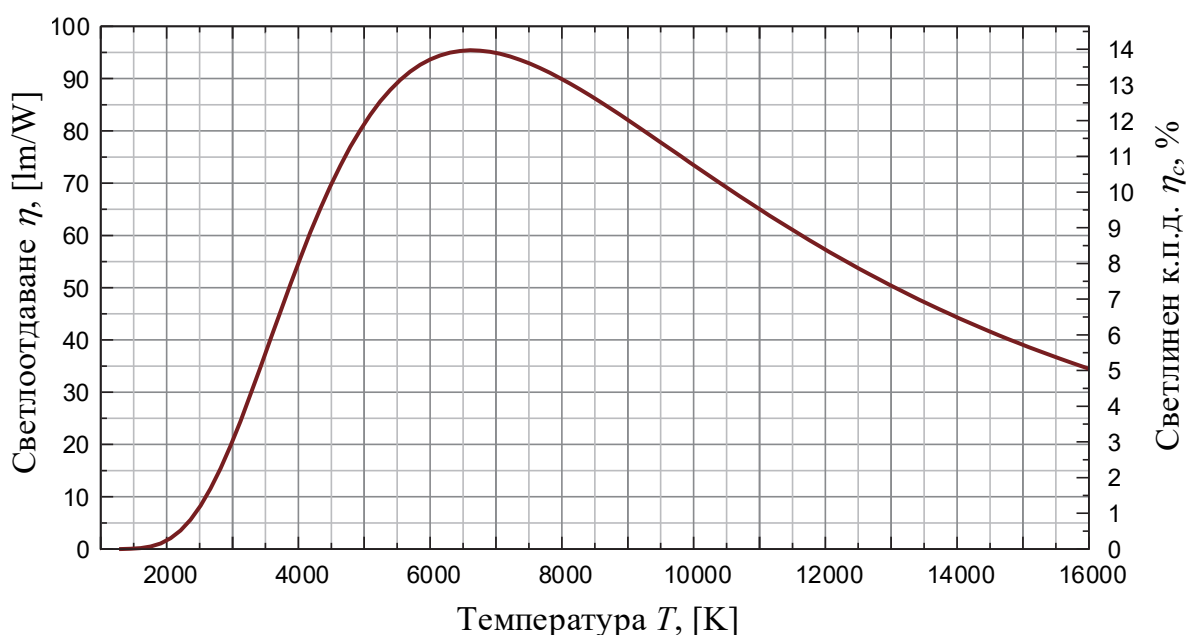
8.2. Ефективност на топлинното излъчване

Голямо значение в светлотехническата практика има въпросът за характера на изменението на светлинната ефективност на топлинния излъчвател от температурата на нагриване.

При характеризиране на ефективността на топлинното излъчване топлинният излъчвател се разглежда като светлинен източник. За количествена оценка на ефективността на топлинното излъчване се въвежда показателят *светлинен коефициент на полезно действие (светлинен к.п.д.)*, който се определя с израз:

$$\eta_c = \frac{\Phi}{\Phi_e} = \frac{\int_0^{\infty} K(\lambda) \Phi_{e,\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda} d\lambda}, \quad (8.7)$$

където: Φ – светлинен поток, в [lm]; Φ_e – лъчист поток, в [W]; $K(\lambda)$ – спектралната светлинна ефективност за фотопично зрение; $\Phi_{e,\lambda}$ – спектралната интензивност на лъчистия поток, в [W/nm]; λ – дължина на вълната, в [nm].



Фиг. 8.3. Зависимост на светлоотдаването и светлинния к.п.д. от температурата на абсолютно черно тяло

На фиг. 8.3 е показана графично зависимостта на светлоотдаването η и светлинния к.п.д. η_c от температурата T в интервал (1 000 ÷ 16 000) K за абсолютно черно тяло. Светлинният к.п.д. η_c се изразява в [%], като 100 % съответства на максимална светлинна ефективност за фотопично зрение $K_m = 683 \text{ lm/W}$ при монохроматично излъчване с $\lambda_m = 555 \text{ nm}$ (в жълто-зеления цвят на видимия спектър). Максималната стойност за светлинния к.п.д. η_c се получава при температура $T = 6\,500 \text{ K}$, когато максимумът на кривата на спектралната интензивност се явява при $\lambda_m = 555 \text{ nm}$, т.е. съвпада с максимума на спектралната светлинна ефективност $K(\lambda)$. В този случай $\eta_c = 14,5 \%$ и това представлява теоретично възможната максимална стойност на светлинния к.п.д. на топлинен излъчвател – много ниска стойност за съвременните изисквания за енергийна ефективност на електрическото осветлението [19,100].

Светлоотдаването η е мярка за енергийна ефективност на светлинния източник и се определя с отношението на излъчения светлинен поток Φ и консумираната активна мощност P :

$$\eta = \frac{\Phi}{P}. \quad (8.8)$$

Светлоотдаването на светлинен източник се измерва в [lm/W].

Светлоотдаването определя класа на енергийна ефективност на светлинния източник [24]. В табл. 8.1 са представени класове на енергийната ефективност на светлинни източници в зависимост от тяхното светлоотдаване. Колкото по-висока е стойността на светлоотдаването, толкова по-ефективен е светлинния източник.

Таблица 8.1. Класове на енергийната ефективност на светлинни източници в зависимост от светлоотдаването

Клас на енергийна ефективност	Общо светлоотдаване η [lm/W]
A	$210 \leq \eta$
B	$185 \div 210$
C	$160 \div 185$
D	$135 \div 160$
E	$110 \div 135$
F	$85 \div 110$
G	$\eta < 85$

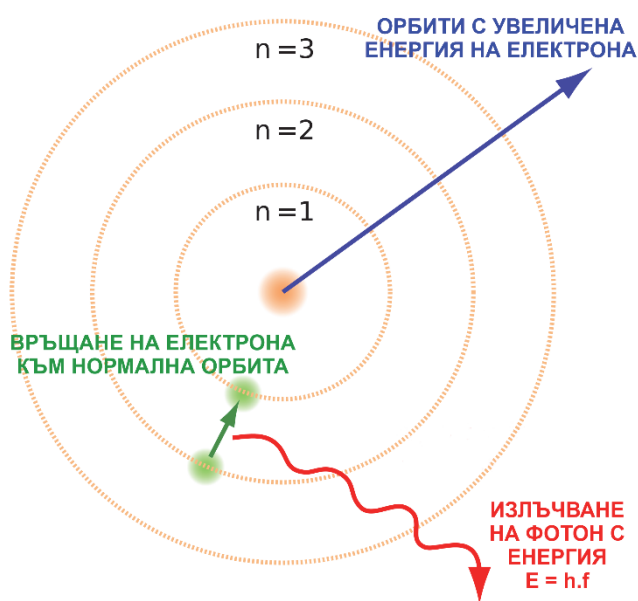
8.3. Луминесцентно излъчване

За разлика от топлинното излъчване, което се дължи на вибрациите на цели атоми, луминесценцията включва само електрони. Обикновено се появява при нормални и значително по-ниски температури в сравнение със топлинното излъчване и затова луминесценцията понякога се нарича „студено“ излъчване.

Луминесцентна светлина се получава, когато електрон излъчва част от енергията си като електромагнитно излъчване. За да бъдат на определено енергийно ниво електроните трябва да имат съответстващото му количество енергия. Когато електроните скочат надолу към по-ниски енергийни нива, се освобождава определено количество енергия, което се превръща в светлина с определен цвят. За да поддържат непрекъснато количество луминесценция, електроните изискват непрекъснато възбуждани, за да бъдат изтласкани до по-високи енергийни нива, така че цикълът да продължи. Това възбуждане може да бъде осигурено от различни източници - например неонов светлини, флуоресцентна светлина, електрически токове, биолуминесценция, напр. - дори животни като светулки. Неоновите светлини произвеждат светлина чрез електролуминесценция, която включ-

ва високо напрежение, което прокарва ток през газа, който го възбужда и в крайна сметка го кара да излъчва светлина. Биолуминесценцията е образуване на светлина от живи организми, напр. светулки. Флуоресцентната светлина включва два вида луминесценция - електролуминесценция и фотолуминесценция. Обичайните употреби включват флуоресцентни лампи, телевизори и компютърни екрани.

Излъчването от луминесцентни източници е резултат от възбуждането на единични валентни електрони на атом, или в газообразно състояние, където всеки атом е свободен от намеса от своите съседи, или в кристална твърда или органична молекула, където действието на неговите съседи упражнява подчертан ефект. В първия случай се получават линейни спектри, като тези на живачни или натриеви дъги. Във втория случай се получават тесни емисионни ленти, които покриват част от спектъра (обикновено във видимата област). И двата случая контрастират с излъчването от топлинни източници, където неравномерното възбуждане при висока температура на свободните електрони на огромен брой атоми води до всички дължини на вълната на излъчването, за да се образува непрекъснат спектър, както беше обсъдено в "топлинно излъчване" по-горе.



Фиг. 8.4. Онагледяване на луминесценцията с атомен модел на Бор

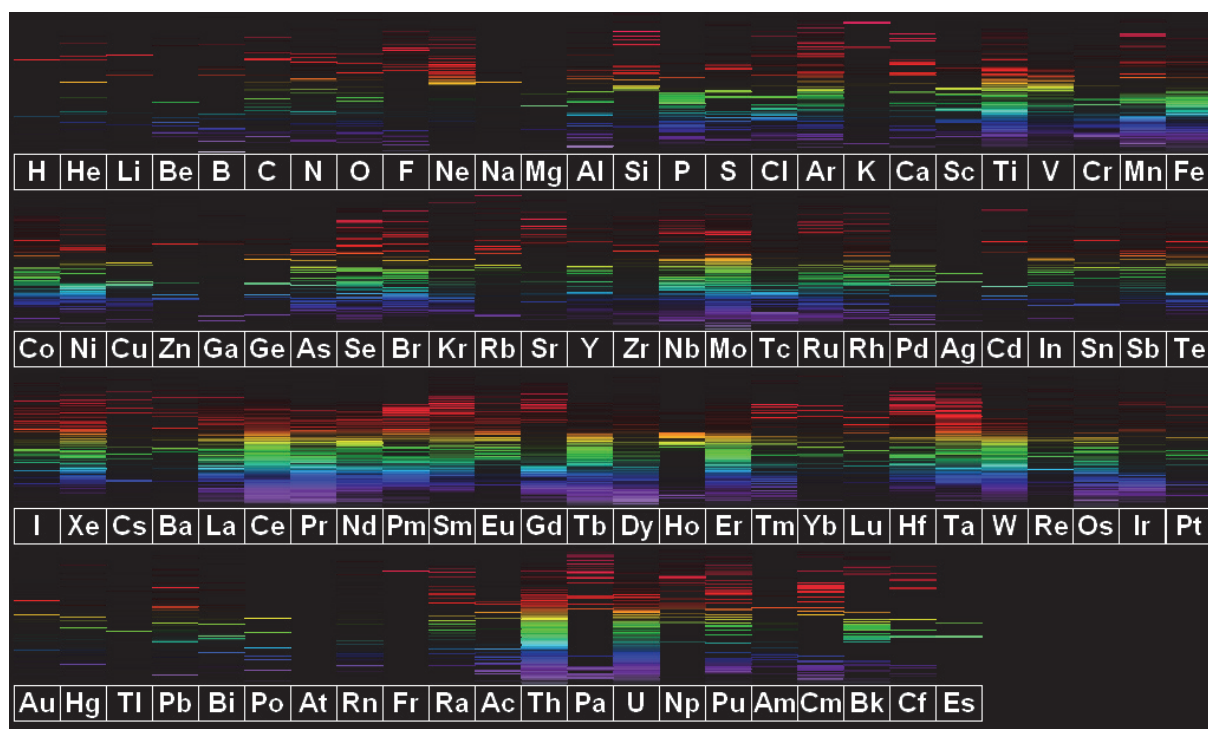
За физическо онагледяване на явлениято луминесценция може да се използва атомният модел на Бор (1913) – фиг. 8.4. Според този модел всеки атом е образуван от положително атомно ядро с въртящи се около него отрицателни електрони. Те са разпределени в различни слоеве, следвайки определени орбити. Обикновено в атома има електрически баланс и броят на положителните заряди е равен на броя на отрицателните заряди (електрони). Този баланс е известен като фундаментално състояние на атома, при което електроните са в най-вътрешната орбита $n=1$ (фиг. 8.4). Ако коли-

чество енергия се подаде към електрона отвън, електронът се възбужда и преминава от нормалната си орбита $n=1$ към следващата с по-високо енергийно ниво $n=2$ или към друга по-външна $n=3$ и т.н. Така подадената енергия се абсорбира и нарушава баланса на атома. Затова след кратко време на това ниво, електронът се връща отново в нормалната си първоначална орбита (зелена линия на фиг. 8.4), като излъчва количеството енергия погъл-

нато при възбуждането му, обикновено под формата на фотон (червена крива на фиг. 8.4).

Излъчването на енергия, трансформирана в този процес от атомна гледна точка, се извършва на части или прекъснати части, известни като енергийни кванти. Въпреки това, в областта на практическата осветителна техника, светлината, излъчвана при луминесценцията, се счита за непрекъснато излъчвана във времето под формата на електромагнитни вълни.

С помощта на теорията за енергийните кванти, формулирана от Планк, е доказано, че при възбуждане различните химични елементи не излъчват непрекъснат спектър поради различната структура на техните електронни слоеве, а само много определени дължини на вълните (емисионни линии) в целия електромагнитен спектър. Емисионните линии на химичните елементи, наблюдавани през дифракционна решетка, са дадени на фиг. 8.5. Всяко вещество или газ има собствен характерен линеен спектър на емисионните линии.



Фиг. 8.5. Видими спектрални емисионни линии на химичните елементи [94]

Теоретично, луминесценцията може да бъде определена като допълнително излъчване към топлинното излъчване на телата. Продължителността на луминесцентното излъчване е $t \geq 10^{-10}$ s. Това определение може да се изрази със следната зависимост:

$$r_{\lambda}(\lambda) = r(\lambda, T) - r_s(\lambda, T)\varepsilon_r(\lambda, T), \quad (8.9)$$

където: $r_\lambda(\lambda)$ – спектрална интензивност на плътността на луминесцентното излъчване; $r(\lambda, T)$ – пълна спектрална интензивност на плътността на излъчване на реалното тяло; $r_s(\lambda, T)$ – пълна спектрална интензивност на плътността на излъчване на абсолютно черно тяло при температура T ; $\varepsilon_\lambda(\lambda, T)$ – спектрален коефициент на излъчване при температура T на реалното тяло.

В зависимост от характера на физическия процес различните разновидности на луминесценцията се подразделят на три групи: самостоятелно, принудително и рекомбинационно светене [19].

При *самостоятелното светене* електронът на атома получава енергия отвън и преминава от нормално към възбудено енергийно ниво за много кратко време – 10^{-9} s. Под действието на полето на самата възбудена частица електронът се връща в нормалното си изходно енергийно ниво, като едновременно с това се излъчва енергия $hf_{изл} = hf_\lambda$.

При *принудителното светене* с възбуждане на атома електронът преминава от нормалното си не възбудено енергийно ниво във възбудено ниво. След това той попада на метастабилно ниво, откъдето преходът към не възбуденото състояние е малко вероятен. При евентуални удари от втори ред между частиците електронът отново се връща във възбуденото ниво, откъдето е възможно връщането му на изходното не възбудено енергийно ниво, което е съпроводено с излъчване на квант енергия. Продължителността на принудителното светене е с няколко порядъка по-голяма в сравнение със самостоятелното светене.

Рекомбинационното светене е характерно за вещества с кристален строеж, чиято решетка е нарушена от включване на примеси, които се наричат активатори. Такава структура имат луминесциращите вещества, които се използват в луминесцентните лампи. При рекомбинационното светене в процеса на преобразуване на енергията и излъчването участва целият луминофор, тъй като в рекомбинация встъпват електрони и йони, получени от различни атоми.

В зависимост от начина на преобразуване и вида на енергията на възбуждане се различават следните видове луминесценция:

- *електролуминесценция* – възбуждането на луминесциращите атоми и молекули се причинява от ударите на електрони и йони, които се движат в електрическо поле;
- *фотолуминесценция* – луминесциращите частици се възбуждат и излъчват при поглъщане на фотони от видимата част на спектъра – на този принцип работят луминесциращите вещества на светодиодни и рядни светлинни източници;
- *рентгенолуминесценция* – излъчването е в резултат от облъчването на луминесциращото вещество с рентгенови лъчи;

- *радиолуминесценция* – излъчване на някои вещества под действието на съставните части на радиоактивното разпадане (α -частици, β -частици и γ -частици);
- *механолуминесценция* – излъчване във видимия спектър в резултат на механично въздействие върху твърдо тяло;
- *сонолуминесценция* – излъчване във видимия спектър, което се предизвиква от звук с висока честота;
- *кристалолуминесценция* – в резултат на кристализация се отделя енергия, която при определени условия се излъчва като светлина;
- *хемилуминесценция* – непосредствено преобразуване на химическата енергия във видимо излъчване; към този вид луминесценция следва да се отнесе светенето при бавно окисляване (светене на фосфора);
- *биолуминесценция* – преобразуване на химическата енергия във видимо излъчване в живи организми – например светенето на светулката, чийто светлинен к.п.д. достига 97 %.

Електролуминесценцията и фотолуминесценцията представляват особен интерес, тъй като на тях се основават луминесцентните лампи и светодиодните източници с луминофор.

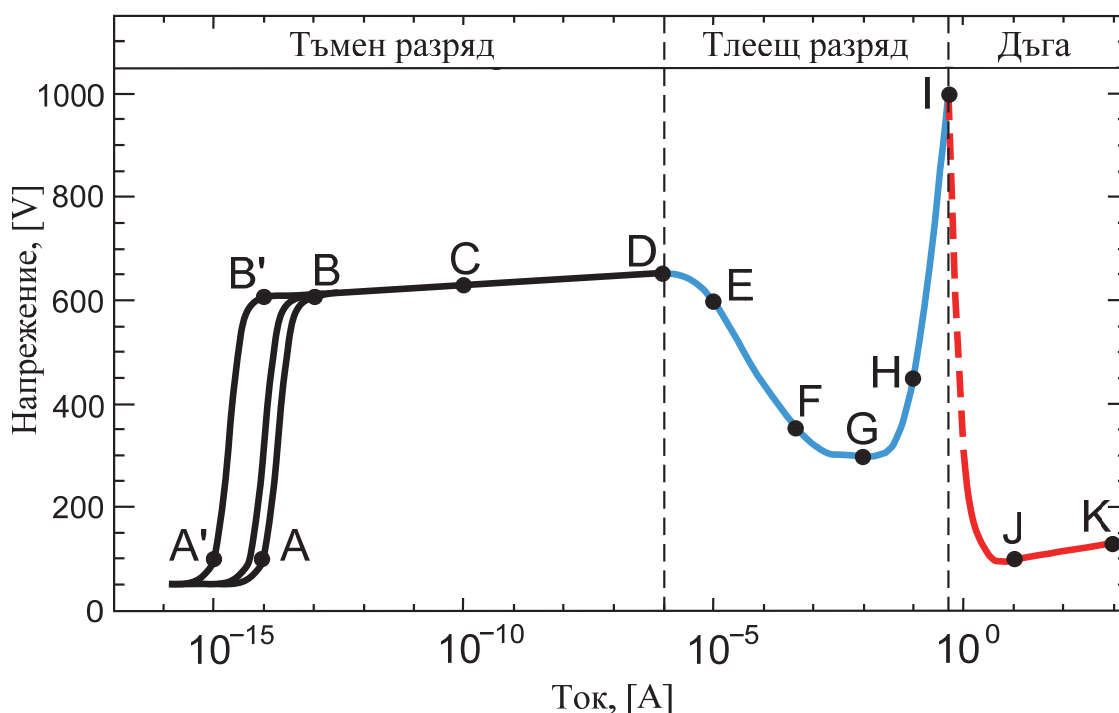
Електролуминесценцията се наблюдава при електрически разряд в газова среда. За да протича ток в газова междина, е необходимо електроните да преминат от повърхността на катода в газа, а от газа – в анода. Освобождаването (избиването) на електрони от повърхността на твърд проводник изисква загуби на енергия за преодоляване на потенциалната граница, съществуваща между електрода и газова среда. При влизането на електрони в анода част от тяхната енергия се изразходва за нагряването му. За облекчаване на избиването на електрони от повърхността на катода се вземат специални мерки, например подгряване на електродите, покриване на повърхността им с активни вещества, които повишават емисионните свойства на катода [21].

Волт-амперна характеристика (ВАХ) на различните форми на електрически разряд в газова среда е показана на фиг. 8.6 [105].

Основните форми на електрическия разряд в газове и метални пари са тъмен (тих), тлеещ и дъгов разряд [19].

Тъмният разряд съответства на черния участък на кривата – частта от точка А до точка D (фиг. 8.6). В точка А на ВАХ има случайни импулси, в точка В – ток на насищане, в точка С – електронна лавина, точка D – самоподдържащ се разряд. При тъмния разряд все по-голям брой електрони и йони достигат електродите. При своето движение електроните се сблъскват с атомите на газа, като някои от ударите се съпровождат с йонизация на атомите и токът се увеличава. Условия за възникване на самостоятелен разряд обаче няма, тъй като йоните нямат йонизационни способности поради по-голямата си маса и йонизацията на газа се обуславя един-

ствено от електроните. При отстраняване действието на външните йонизатори, електрическият разряд се прекратява.



Фиг. 8.6. ВАХ на различните форми на електрически разряд

Тлеещият разряд съответства на синия участък на кривата – на частта от точка D до точка I (фиг. 8.6). В точка E на ВАХ има коронен разряд, точка F – аномален тлеещ разряд, точка G – нормален тлеещ разряд, точка H – аномален тлеещ разряд, точка I – преходна зона към дъгата. С повишаване на приложеното на електродите напрежение се увеличават степента на йонизация и броят на електроните и йоните. Поради по-малката скорост на йоните се получава групиране на йони пред катода. Така оформеният положителен обемен заряд предизвиква неравномерно разпределение на потенциала по дължината на тръбата и значителна интензивност на електрическото поле пред катода. В резултат на това йоните се ускоряват и при удар в катода освобождават от него електрони, които на свой ред стават източници на йонизация. При такава вторична емисия електрическият разряд става независим от външните йонизатори. Тлеещият разряд се съпровожда със светене. Негова особеност е голямото изменение на потенциала пред катода – от 50 V до 400 V. Токът в зоната от точка G до точка I на тлеещия разряд се увеличава при повишаване на напрежението на електродите. Едновременно с това бомбардировката на катода с йони става все по-интензивна, тъй като техните брой и скорост също се увеличават. Катодът постепенно се загрява до температурата, при която започва термоелектронна емисия (точка I на фиг. 8.6). Големият брой на излъчваните електрони от катода неутрализират положителния обемен заряд и по този начин се

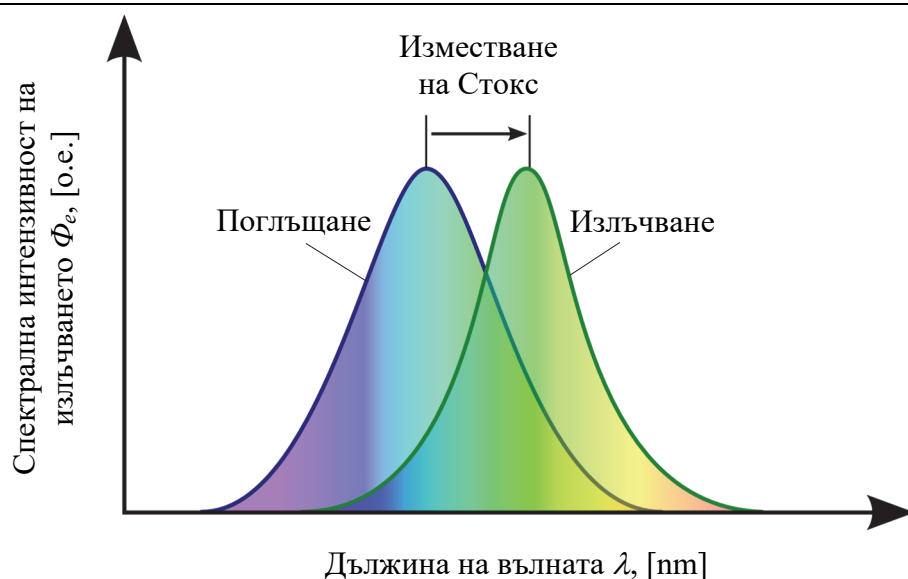
намалява съпротивлението на областта до катода. Освен това високата температура на електрическият заряд, особено в областта пред анода, създава условие за интензивна ударна йонизация на атомите на газа (термична йонизация).

Дъговият разряд съответства на червения участък на кривата – на частта от точка I до точка K (фиг. 8.6). След точка I на ВАХ започва дъговият разряд. Проводимостта в междуелектродното пространство се увеличава и дъговият разряд става възможен при по-ниски напрежения между електродите. В точка J на дъговия разряд се изразява нормалният режим на работа на разрядните светлинни източници (луминесцентни лампи, компактни луминесцентни лампи, живачни лампи, натриеви лампи с високо и ниско налягане, металхалогенни лампи и др.). Поради падащия характер на кривата за ограничаване на големината на тока и стабилизиране на режима на работа последователно на дъговия разряд се включва баластно съпротивление. Дъгов разряд се проявява при различно налягане на газовата среда – от 0,1 Pa до няколко десетки MPa, и при различна големина на тока – от стотици mA до десетки kA.

Фотолуминесценцията намира широко приложение в светлинните източници, чиито лъчи (видими при светодиодите или невидими при живачните пари на разрядните лампи) с един честотен спектър се преобразуват във видими лъчи с друг честотен спектър посредством специални луминесциращи вещества, наречени *люминофори*. Като люминофори се използват сложни синтетични неорганични вещества с дефектна кристална решетка: фосфати, силикати, волфрамати, халофосфати на калция и други съединения на различни метали. Като активатори за нарушаване на еднородността на кристалната решетка се прилагат сребро (Ag), мед (Cu), манган (Mn), антимон (Sb) и различни соли, чрез които посредством термична обработка в люминофора се формира дупчеста проводимост. [19,22].

Люминофорите се поставят от вътрешността на стъкловидната тръба на някои лампи (луминесцентни и компактни луминесцентни лампи, някои живачни лампи и по-рядко на натриеви лампи и металхалогенни лампи).

При люминофори с едно основно вещество и от един активатор спектрът на възбуждане не влияе на спектралния състав на излъчването. Това влияние обаче може да бъде чувствително, когато люминофорът е със сложен състав с няколко активатора. На фиг. 8.7 е показано спектралното разпределение на възбуждащото излъчване и на луминесценцията. Спектърът на излъчване като цяло и неговият максимум винаги са изместени в зоната на по-дългите вълни в сравнение със спектъра на поглъщане. Зависимостта, която съществува между тези два спектъра, е формулирана със закона на Ломел – Стокс, а диаграмата на фиг. 8.7 е известна като *диаграма на изместването на Стокс* [19,115].



Фиг. 8.7. Диаграма на изместването на Стокс между спектрите на поглъщане и излъчване на светлината

Зоната на препокриване на спектрите на поглъщане и излъчване (фиг. 8.7) се нарича антистоксова област. Тя изразява графично възможността фотонът на луминесценцията да бъде с по-малка дължина на вълната от тази на погълнатия фотон. Това е възможно при луминофори с по-висока температура, когато кинетичната енергия на колебателното движение на електрона е по-голяма и при поглъщане на квант енергия на възбуждане се получава по-голям квант на излъчване.

Фотолуминесценцията намира приложение и в светодиодното осветление. Една от основните съвременни технологии за постигане на бяла светлина се базира на нанасяне на тънък слой луминофор върху син (или ултравиолетов) светодиод. При нея най-често се използва легиран с церий (Ce) итриев алуминиев гранат (YAG – Yttrium aluminium garnet), който се използва като луминофор върху синия LED. Част от енергията от електролюминесценцията на синия светодиод в диапазона $450 \text{ nm} < \lambda < 500 \text{ nm}$ облъчва и възбужда луминофорния слой да започне да излъчва в останалата част от спектъра, с по-голяма дължина на вълната, като комбинацията покрива цялата видима част на спектъра и се превръща в бяла светлина. Белият цвят на излъчваната светлина може да има различни нюанси, които да се получат чрез добавяне на химични компоненти в луминофорния слой. Разработката и навлизането на нови видове луминофори в производството на светодиоди е в основата на подобряването на техните цветови характеристики и енергийна ефективност.

9. НАЖЕЖАЕМА ЛАМПА. НАЖЕЖАЕМА ХАЛОГЕННА ЛАМПА

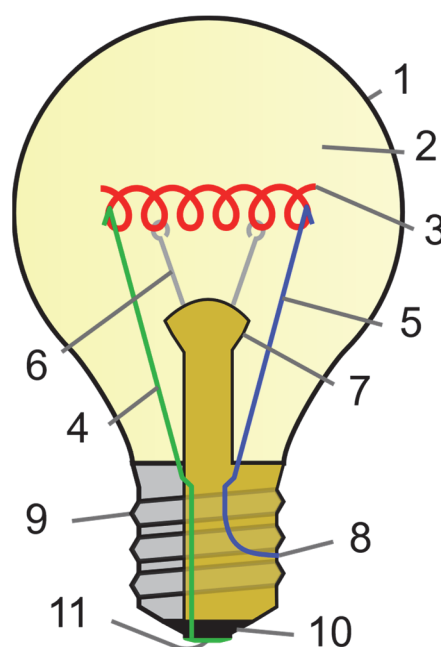
9.1. Нажежаема лампа

а) Устройство на нажежаема лампа

Нажежаемата лампа (НЛ) е светлинен източник с топлинно излъчване. Устройството на съвременна нажежаема лампа за общо предназначение (фиг. 9.1) включва: 1-стъклена колба; 2-газонапълнено пространство с инертен газ (аргон, азот, ксенон, криптон); 3-волфрамова нажежаема спирала; 4- и 5-електроди; 6-молибденови държатели; 7-стъклена колона (пръчка); 8-извод; 9-цокъл; 10-изолация; 11-контакт на цокъла. Стандартната нажежаема лампа най-често има крушообразна форма на колбата [19,27,112].



Фиг. 9.1а. Външен вид на нажежаема лампа



Фиг. 9.1б. Съставни елементи на нажежаема лампа

Нажежаемите лампи могат да бъдат вакуумни или газонапълнени. Топлинните загуби при вакуумните лампи са по-малки, тъй като няма загуби от конвекция. От вътрешната страна на стъклената колба въздухът се изтегля и температурата на нагряване достига между 2 500 K и 3 000 K. При вакуум интензивността на разпръскване на волфрама е висока и затова температурата на нажежаемата жичка трябва да бъде по-ниска – между 2 400 K и 2 500 K.

Съвременните нажежаеми лампи могат да се произвеждат като едноспирални или биспирални. Биспиралните имат по-голяма мощност. Освен спираловидна, волфрамовата нажежаема жичка може да бъде и права. Ако

ламбата е подложена на вибрации и сътресения и е с малка мощност (в повечето случаи $P \leq 60 \text{ W}$), нажежаемата жичка трябва да бъде права [27].

Най-разпространените цокли за нажежаеми лампи с общо предназначение са тип E14 и E27 (означението има следния смисъл: буква „Е“ показва типа на цокъла – с едисонова резба; стойността след буквата показва диаметъра на цокъла в [mm]).

Интензивното изпарение на волфрама, изграждащ нажежаемата жичка, се ограничава посредством въвеждане на инертен газ, който създава определено налягане. Така се повишава и температурата на жичката без да се намаля трайността. Отрицателният ефект на инертния газ е свързан с увеличаване на топлинните загуби при конвекция и топлопроводност. Поради тази причина нажежаемите лампи с по-малка мощност ($P \leq 40 \text{ W}$) и диаметър на жичката $d_{\text{wire}} \leq 0,03 \text{ mm}$ са вакуумни. По-мощните нажежаеми лампи са газонапълнени със смес от аргон (80 %) и азот (20 %). Температурата на газа е приблизително 400 K, налягането 115 kPa. С повишаване на налягането на инертния газ се увеличават топлинните загуби, но намалява скоростта на изпарение на волфрама на жичката. При увеличаване на налягането два пъти, животът на нажежаемата лампа се увеличава с 30 % [19,23,27].

б) Основни параметри на нажежаема лампа

Параметрите на лампите се подразделят на конструктивни, електрически, светлотехнически (фотометрични и цветови), икономически и експлоатационни.

Електрическите параметри са номинално напрежение, номинален ток и номинална активна мощност.

Номинално напрежение на ламбата е захранващото напрежение, при което се получава номиналният светлинен поток на ламбата, посочен от производителя. Номиналното напрежение на нажежаемата лампа може да бъде от няколко волта (автомобилни, сигнални лампи, фенери и др.) до няколко стотин волта (прожектори). Стандартизирани са следните номинални захранващи напрежения: 1,5; 2; 4; 6; 9; 12; 24; 36; 42; 60; 120; 220; 230; 380; 400 V [22].

Номиналната мощност е консумираната мощност, при която се реализират номиналният светлинен поток и допустима температура на ламбата. Номиналната мощност и номиналното напрежение са обозначени от външната страна на колбата или на цокъла.

Нажежаемите лампи с общо предназначение са с мощности от 25 W до 200 W. Номиналният ток се обявява само за еталонните лампи. Например в нажежаема лампа с мощност 60 W протича ток със стойност 0,26 A. Пусковият ток е приблизително 7 пъти по-голям от номиналния, което е причина, когато са в края на живота си, нажежаемите лампи обикновено да изгарят в първоначалния момент на включване към електрическата мрежа.

Причината за по-високия пусков ток е в ниското електрическо съпротивление на жичката в студено състояние. Съпротивлението бързо се увеличава при нейното загряване.

Нажежаемите лампи могат да се захранват и с постоянно напрежение от акумулаторни батерии. Те са предназначени предимно за табла и за осветление в автомобили.

Светлотехническите параметри включват:

- фотометрични – светлинен поток, по-рядко максимален интензитет и габаритна яркост;
- цветови – корелирана цветна температура, общ индекс на цветопрераждане и спектър на излъчване.

Светлинният поток Φ на лампата е основен светлотехнически фотометричен параметър. В табл. 9.1 са показани стойности на светлинния поток при различна номинална мощност на нажежаеми лампи с номинално захранващо напрежение 230 V.

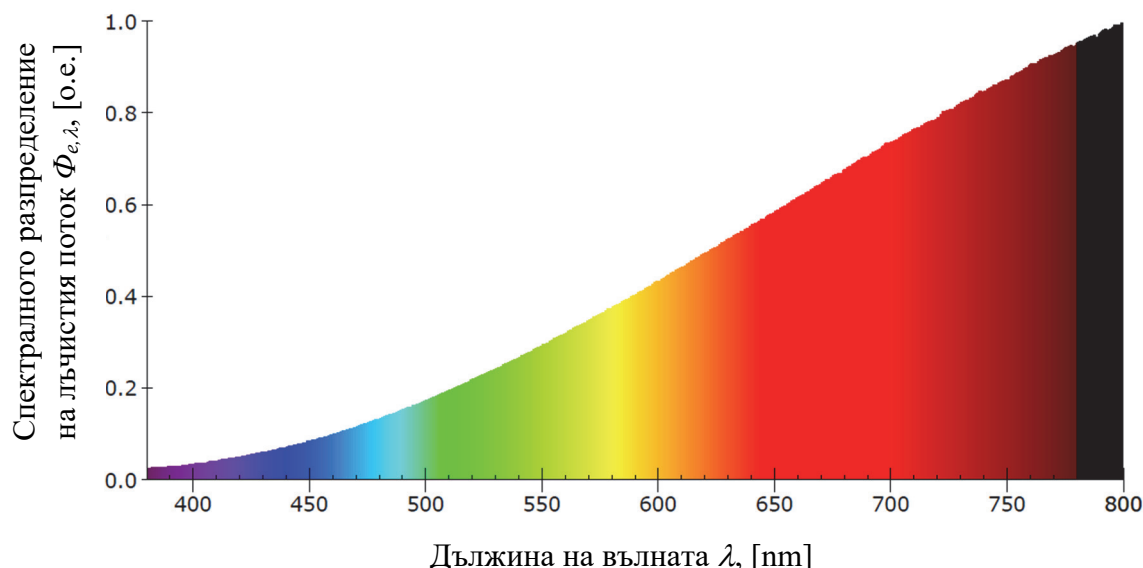
Табл. 9.1. Номинална мощност и светлинен поток на нажежаеми лампи

Номинална мощност P_n , [W]	Светлинен поток Φ , [lm]
15	110
25	220
40	415
60	715
75	950
100	1350

За някои специални лампи (прожекторни и прожекционни осветители с нажежаеми лампи) се посочват максимален интензитет на светлината и/или габаритна яркост.

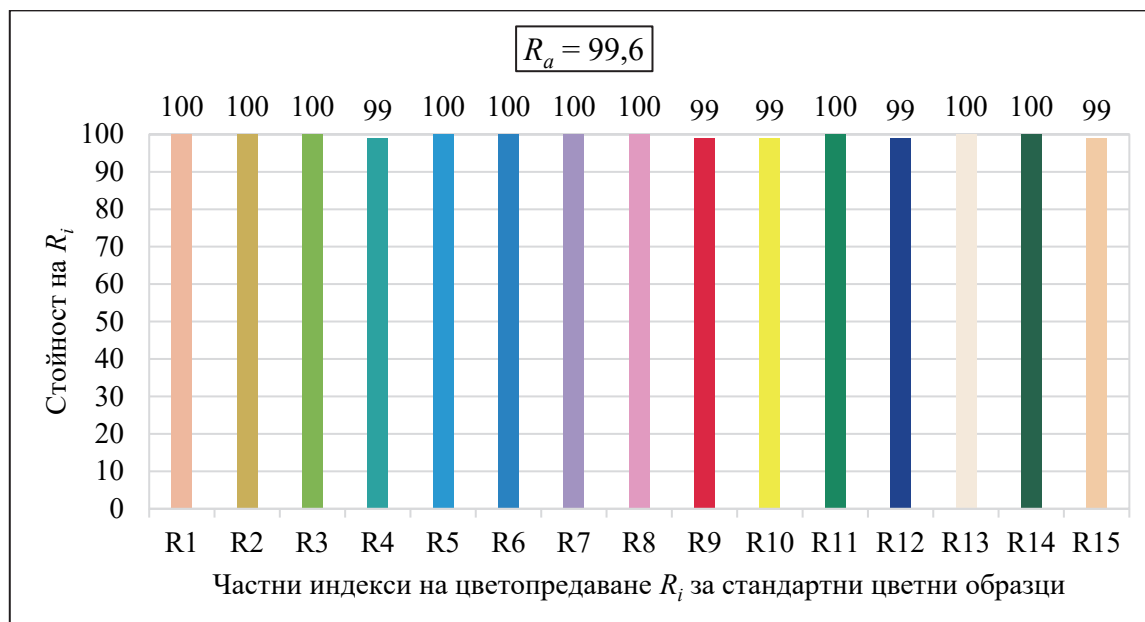
Нажежаемата лампа е топлинен светлинен източник и затова излъчваният от нея спектър и координатите на цветността ѝ се доближават до тези на абсолютното черно тяло. Цветността на излъчването на нажежаемата лампа зависи от температурата на жичката. Корелираната цветна температура на нажежаемата лампа е по-висока с около (50 ÷ 100) K от работната температура на волфрамовата жичка. Корелираната цветна температура за газонапълнените нажежаеми лампи е в границите $T_{cp} = (2\,600 \div 2\,800)$ K; за вакуумните нажежаеми лампи – (2 300 ÷ 2 450) K. Излъчваната светлина е топло бяла.

На фиг. 9.2 е показан спектърът на излъчване (спектралното разпределение на лъчистия поток $\Phi_{e,\lambda}$ в относителни единици) на нажежаема лампа. Вижда се, че във видимата част на спектъра на нажежаемата лампа преобладава излъчването в жълто-червената част. Максималната интензивност на излъчване е във инфрачервената област.



Фиг. 9.2. Спектър на нажежаема лампа

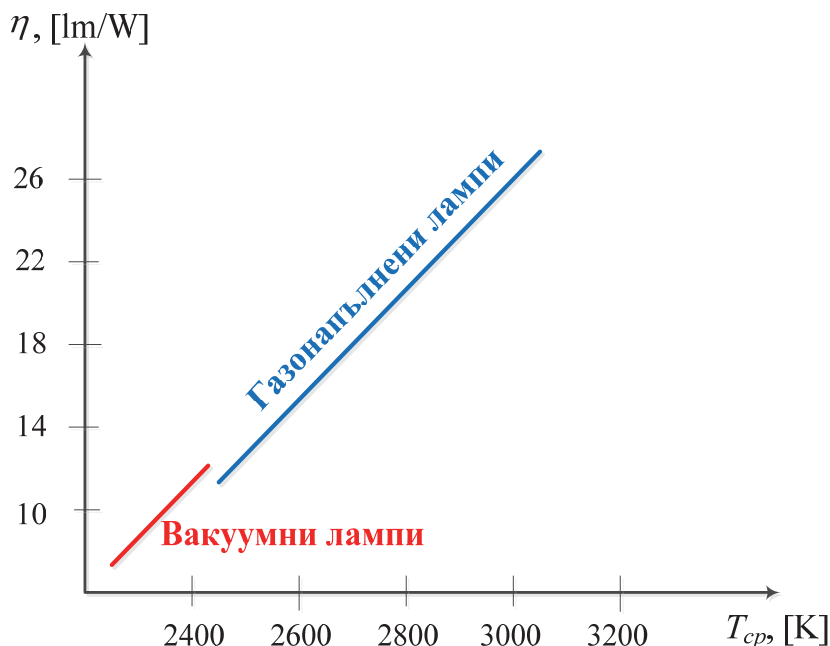
Общият индекс на цвето предаване на нажежаемата лампа е много близък до максималния – $R_a \approx 100$. Отличното цвето предаване на нажежаемата лампа се дължи на нейния непрекъснат спектър. На фиг. 9.3 са показани измерени със спектро радиометър (фиг. 7.15) частни индекси на цвето предаване R_i за 15 стандартни цветни образци и изчислен общ индекс на цвето-предаване R_a на нажежаема лампа с мощност 100 W.



Фиг. 9.3. Частни индекси R_i и общ индекс на цвето предаване R_a на нажежаема лампа

Икономическата ефективност на лампата се характеризира със светлоотдаването η . Нажежаемата лампа има най-ниско светлоотдаване от всички видове лампи, тъй като преобладаващата част от спектъра на из-

лъчване е разположена в невидимата за човешкото око инфрачервена област. Светлоотдаването на нажежаемите лампи за обща употреба е: за вакуумните лампи $\eta = (7 \div 8) \text{ lm/W}$; за газонапълнените с единична спирала $\eta = 12 \text{ lm/W}$; за газонапълнените с двойна спирала $\eta = 12 \text{ lm/W}$; високомощните биспирални лампи имат η до 20 lm/W . Светлоотдаването слабо се увеличава както при повишаване на работната температура на волфрамовата жичка (фиг. 9.4), така и при увеличаване на номиналната мощност на нажежаемата лампа (фиг. 9.5) [22,113].



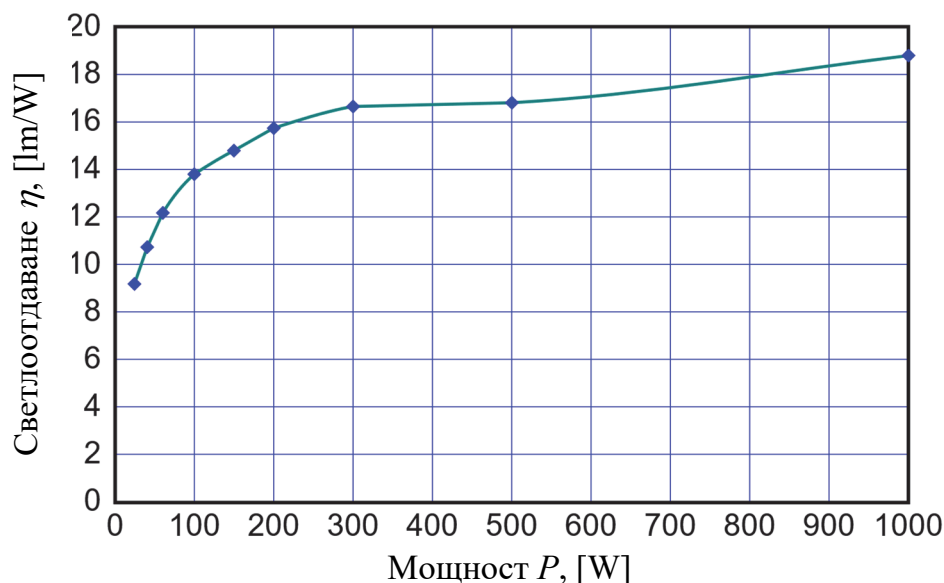
Фиг. 9.4. Зависимост на светлоотдаването от корелираната цветна температура на нажежаемата лампа

Ниското светлоотдаване е основна причина нажежаемите лампи да бъдат забранени за производство и продажба с европейска директива. В периода от 2009 г. до 2012 г. Европейският съюз официално въвежда поэтапна забрана за производство на нажежаеми лампи. През 2009 г. се забраняват нажежаемите лампи с мощност $P \geq 100 \text{ W}$; през 2012 г. се забраняват и лампите с мощност $P \geq 25 \text{ W}$. Директивата цели да се намалят разходите за електрическа енергия за осветление.

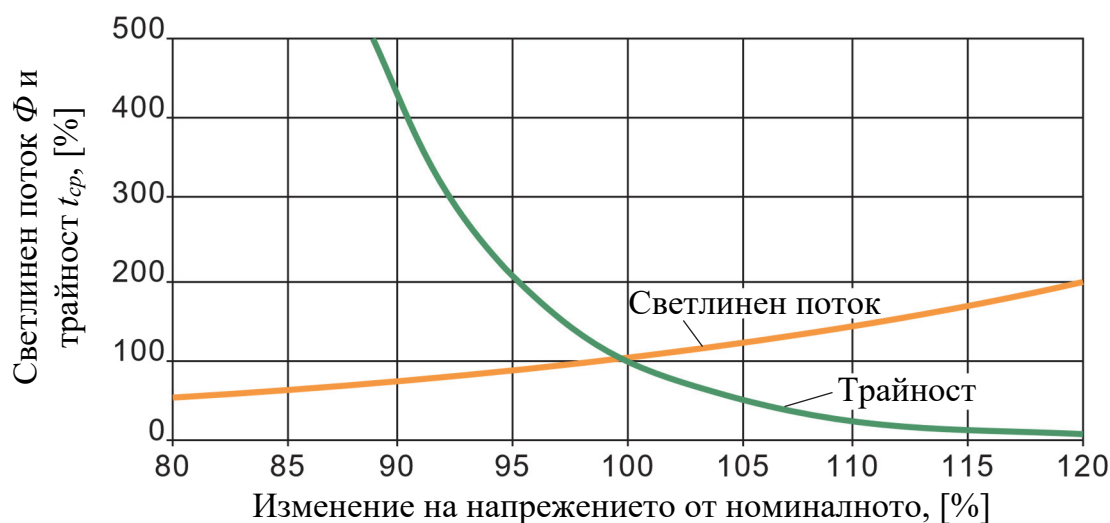
Основният експлоатационен параметър, който също е свързан с икономическата ефективност на лампата, е средната продължителност на работа (трайност) t_{cp} , в [h]. Съвременните нажежаеми лампи имат средна продължителност на работа около 1 000 h – много ниска.

Електрическите, светлотехническите параметри и трайността на лампата силно зависят от захранващото напрежение. На фиг. 9.6 е показана зависимостта на светлинния поток Φ и средната продължителност на работа t_{cp} от изменението на захранващото напрежение на нажежаема лампа.

Препоръчва се допустимото изменение на напрежението при захранване на нажежаеми лампи да бъде $\pm 2,5\%$.



Фиг. 9.5. Зависимост на светлоотдаването от мощността на нажежаемата лампа



Фиг. 9.6. Зависимост на светлинния поток и средната продължителност на работа от изменението на захранващото напрежение

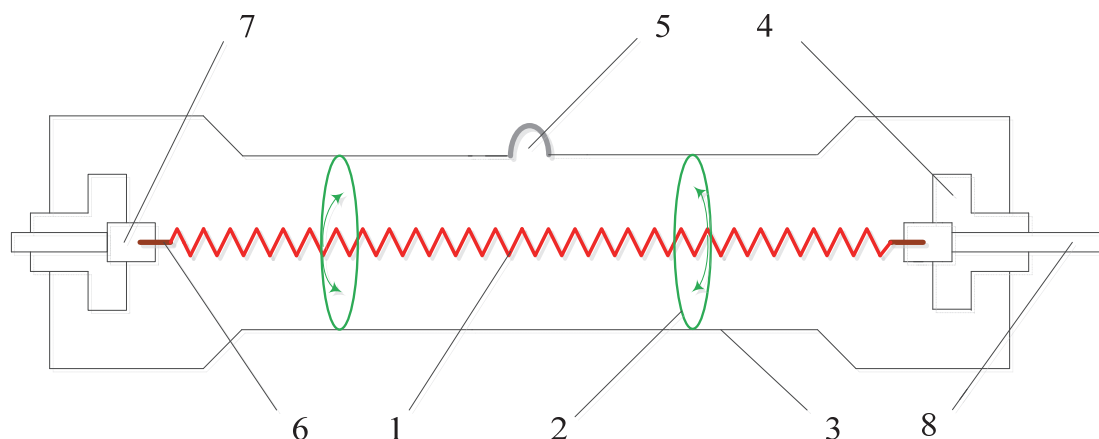
По време на работа (експлоатация) на нажежаемата лампа се извършва непрекъснато разпръскване на волфрама, в резултат на което той се отлага по колбата и се намалява коефициентът на пропускане на светлинния поток. Същевременно диаметърът на жичката намалява и след определено време, при пускане, когато е в студено състояние, тя се скъсва. Върху разпръскването на жичката влияят и редица химични процеси, които възникват по време на нейната работа. Поради недобро вакуумиране на колбата остават различни газове и пари, като въглероден оксид, водни и мас-

лени пари. Нажежаемата лампа също отделя въглероден оксид, водни и маслени пари. В края на живота на нажежаемите лампи намаляването на светлинния поток достига $(10 \div 15) \%$ при газонапълнените и $(20 \div 25) \%$ при вакуумните [22].

9.2. Нажежаема халогенна лампа

а) Устройство на нажежаема халогенна лампа

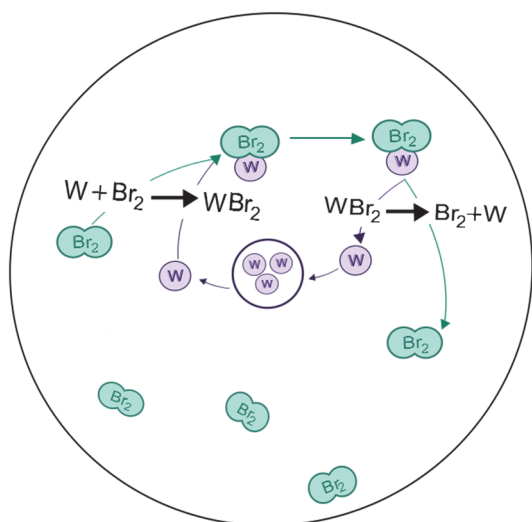
Устройството на нажежаемата халогенна лампа (НХЛ) е подобно на това на нажежаемата лампа с общо предназначение. Волфрамовата спирала (жичка) 1 е разположена в колба (или цилиндър) от кварцово стъкло 3, която е напълнена с инертни газове, примесени с дозирано количество от халогенен елемент – йод, бром, флуор и др. Волфрамовата спирала се укрепва чрез държателите 2. Изводите 6 се съединяват с волфрамовата спирала чрез пресованите плътно в кварцовото стъкло пластини от молибденово фолио 7 и закрепени с порцелан 4. Изпомпването на въздух от цилиндричната кварцова колба се извършва в 5. Електрозахранването на лампата се осъществява от контактните изводи 8.



Фиг. 9.7. Устройство на нажежаема халогенна лампа

Особеност при работа на лампата е проявяването на т.нар. регенеративен халогенен цикъл – фиг. 9.8. Когато в работещата лампа има йодни (или бромни) пари и температурата на колбата удовлетворява неравенството $250\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_{\text{колба}} \leq 1\text{ }200\text{ }^{\circ}\text{C}$, парите на йода образуват с отложените върху колбата волфрамови частици волфрамов йодид (WJ_2), който се изпарява и попадайки обратно върху волфрамовата спирала се разлага на йод (J) и волфрам (W) по следния кръгов процес: $\text{W} + \text{J} \rightleftharpoons \text{WJ}_2$.

Този процес е възможен при условие, че $\theta_{\text{колба}} > 1\text{ }400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Йодните пари се връщат отново към колбата и образуват волфрамов йодид. Извършва се циклично пренасяне на волфрама и възстановяване на жичката. Този кръгов процес може да продължи дълго време, ако са спазени следните условия [22]:



Фиг. 9.8. Регенеративен халогенен цикъл

1) Температурата на вътрешната повърхност на колбата трябва да бъде около $(500 \div 600)^\circ\text{C}$ за създаване на благоприятния условия за изпарение на волфрамовия йодид. Температурата $\theta_{\text{колба}}$ във всеки участък от тази повърхност трябва да удовлетворява посоченото по-горе неравенство, в противен случай, при участъци с $\theta_{\text{колба}} < 250^\circ\text{C}$, ще се отлага волфрамов йодид, а в участъци с $\theta_{\text{колба}} > 1\,200^\circ\text{C}$ – чист волфрам;

2) Ако температура на волфрамовата спирава е по-голяма или равна на $1\,600^\circ\text{C}$ се обезпечава пълната дисо-

циация на волфрамов йодид;

3) Количеството йод трябва да бъде точно дозирано и постоянно във времето; по-голямото количество йод (за компенсация на евентуални загуби) води до поглъщане на светлинното излъчване в областта $(500 \div 520)\text{ nm}$ и намаляване на светлоотдаването;

Характерна особеност е, че тези лампи трябва да работят в хоризонтално положение с минимален наклон, не по-голям от $\pm 4^\circ$, за да може халогенното съединение да попада върху цялата дължина на жичката. Освен това колбата не трябва да се докосва с пръсти.

Освен йод в кварцовата колба на лампата могат да са добавят бром, хлор, флуор и ксенон. По-добрите топлоизолационни свойства на ксенона водят до увеличаване на работната температура на жичката, при което се увеличава светлоотдаването.

б) Основни параметри на нажежаема халогенна лампа

Основните параметри на тръбните нажежаеми халогенни лампи са представени в табл. 9.2 [1].

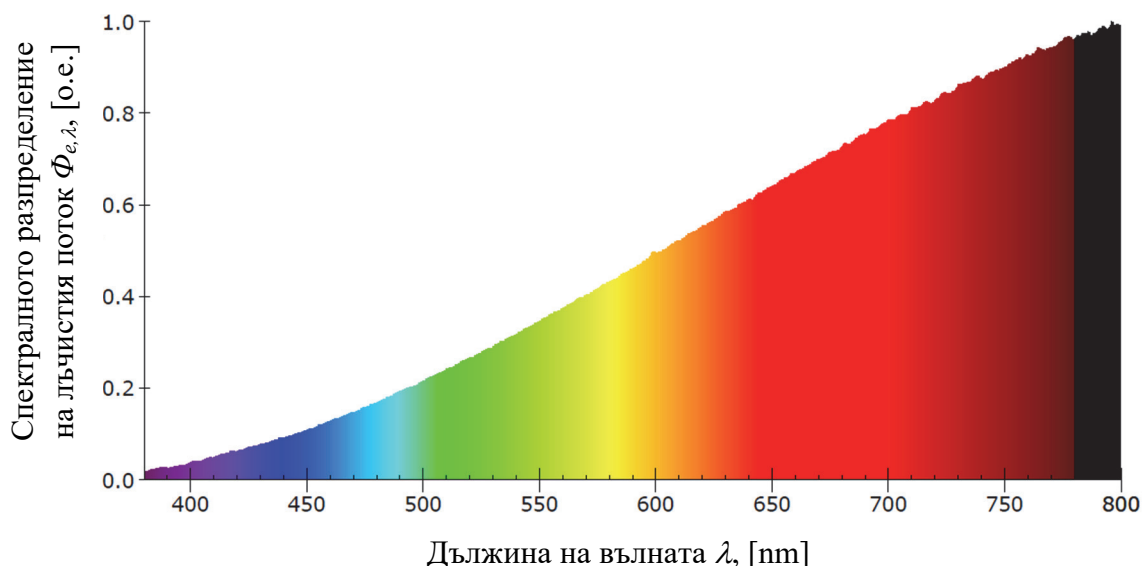
Табл. 9.2. Основни параметри на тръбни нажежаеми халогенни лампи

Мощност, [W]	Светлинен поток [lm]	Трайност, [h]	Дължина, [mm]
500	9 500	1 000	119,66
1 000	22 000	2 000	191,1
1 500	33 000	2 000	265,1
2 000	44 000	2 000	334,4

Предимствата на нажежаемата халогенна лампа спрямо обикновената нажежаема лампа са следните [19,22,27,73].

Светлоотдаването на нажежаемата халогенна лампа е два пъти по-високо от това на нажежаемата лампа – $\eta = (18 \div 22) \text{ lm/W}$. Използването на кварцово стъкло, което е устойчиво при високи температури, дава възможност при подходящо оразмеряване на цилиндъра или колбата на лампата да се получи по-високо налягане от това в обикновената лампа с нажежаема жичка. С това се постига до 1,5 пъти по-голямо светлоотдаване или при същото светлоотдаване се повишава значително трайността на лампата.

Нажежаемата халогенна лампа има по-висока корелирана цветна температура – $T_{cp} = (2\,800 \div 3\,200) \text{ K}$ – бялата светлина подчертава топлините нюанси, но в по-малка степен спрямо нажежаемата лампа. Подобно на нажежаемата лампа, и нажежаемата халогенна лампа има максимален общ индекс на цветопрераждане – $R_a = (99 \div 100)$, тъй като непрекъснатият ѝ спектър е близък до спектъра на абсолютно черно тяло (фиг. 9.9).



Фиг. 9.9. Спектър на нажежаема халогенна лампа

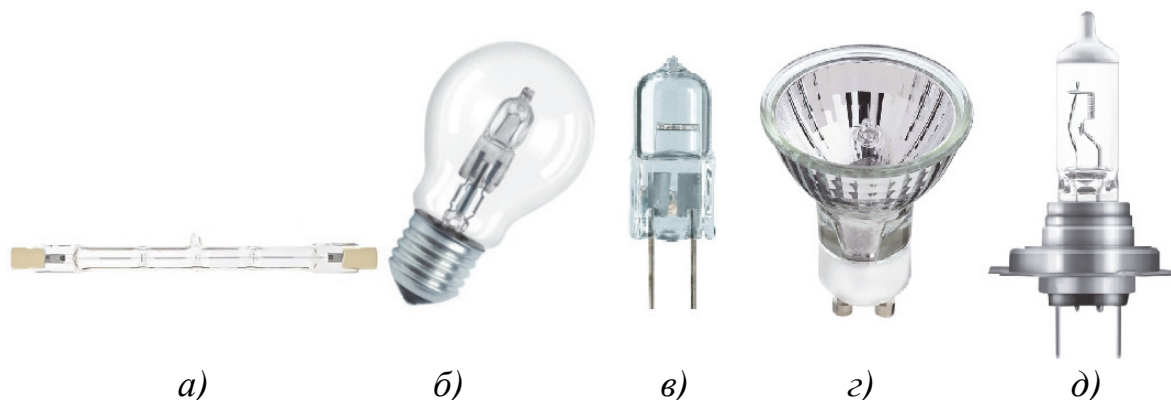
Средната продължителност на работа на нажежаемата халогенна лампа е $t_{cp} = 2\,000 \text{ h}$ – два пъти по-голяма от тази на нажежаемата лампа, в резултат на регенеративния цикъл.

В края на живота на нажежаемите халогенни лампи намаляването на светлинния поток е незначително.

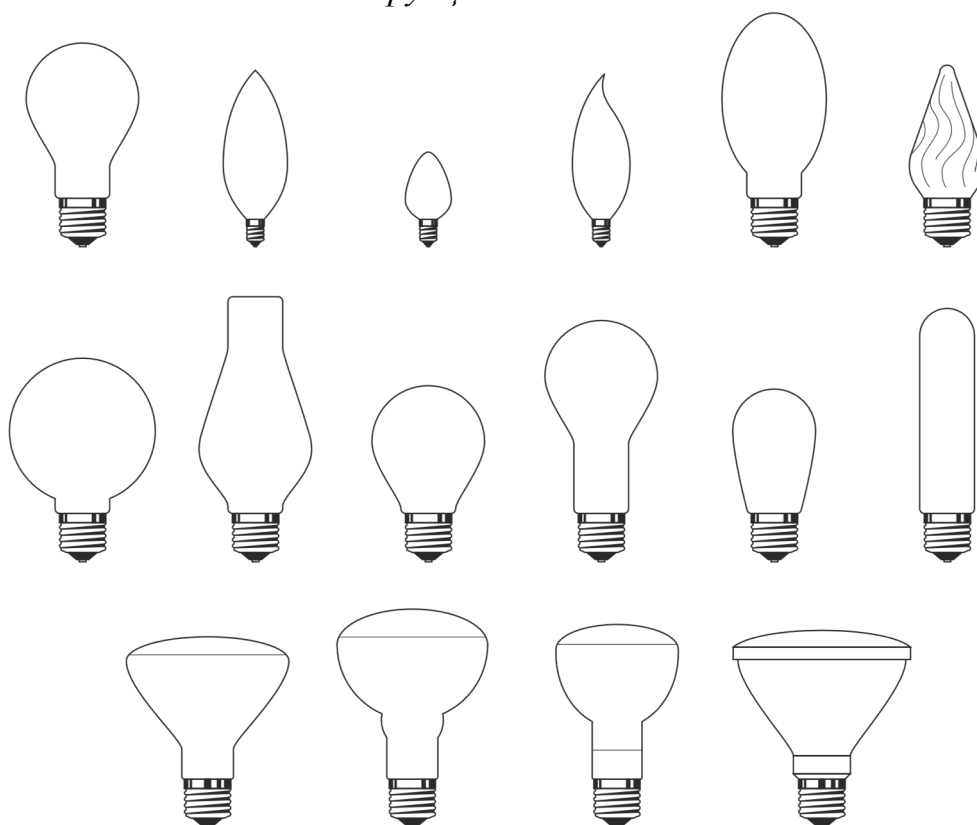
Нажежаемите халогенни лампи могат да се произвеждат с по-малък размер от нажежаемата лампа. Има различни конструкции на нажежаеми халогенни лампи, част от които са показани на фиг. 9.10.

Съвременните изисквания за енергийна ефективност не съответстват на ниското светлоотдаване и на нажежаемите халогенни лампи. Затова през септември, 2018 г. Европейският съюз забранява производството на повечето видове нажежаеми халогенни лампи.

Преди забраната, тези лампи се използваха в студия при цветни снимки или телевизионни предавания (фиг. 9.10а), поради отличното цвето предаване. Използваха се и в зали, офиси, локално и жилищно осветление (фиг. 9.10б,в,г), автомобилно осветление (фиг. 9.10д) и др.



Фиг. 9.10. Различни конструкции на нажежаеми халогенни лампи



Фиг. 9.11. Различни форми и размери на нажежаеми и нажежаеми халогенни лампи

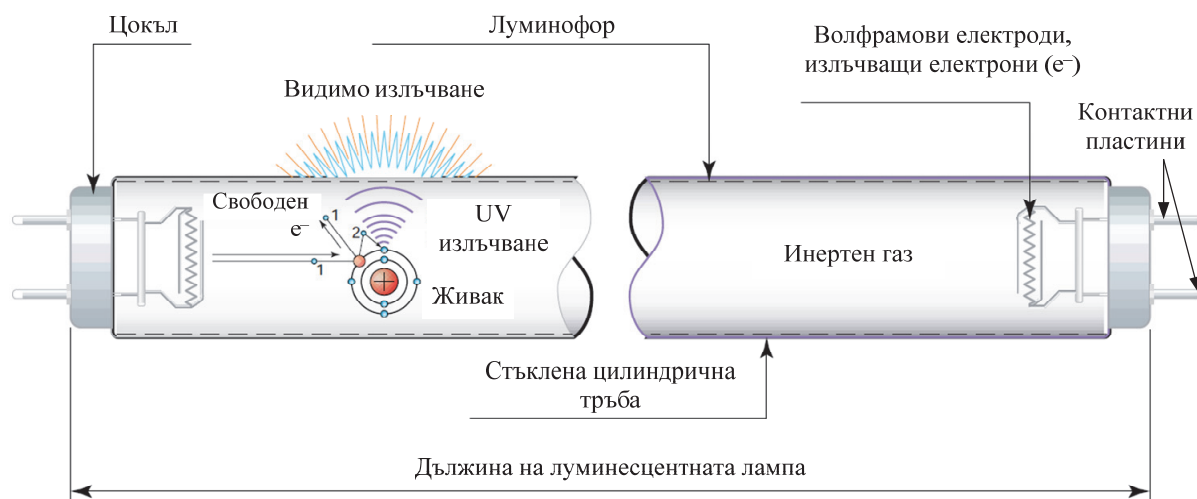
Съществува голямо разнообразие на форми и размери на нажежаеми и нажежаеми халогенни лампи. На фиг. 9.11 са показани различни видове на този вид лампи.

10. ЛУМИНЕСЦЕНТНА ЛАМПА. КОМПАКТНА ЛУМИНЕСЦЕНТНА ЛАМПА. ИНДУКЦИОННА ЛАМПА

10.1. Луминесцентна лампа

а) Устройство на луминесцентна лампа

Луминесцентната лампа (ЛЛ) принадлежи към групата на разрядните светлинни източници с ниско налягане. Устройството на луминесцентна лампа с подгряващи електроди е показано на фиг. 10.1 [73].



Фиг. 10.1. Устройство на луминесцентна лампа

Стъклената цилиндрична тръба на луминесцентната лампа може да има различен диаметър – 38 mm (тип T12), 26 mm (тип T8), 16 mm (тип T5) или 12 mm (тип T4). Върху вътрешната повърхност на стъклената тръба е нанесен луминофор. Волфрамовите електроди са изпълнени във вид на биспирала или триспирала, покрита със специална оксидна паста, която осигурява значително по-голяма емисия на електрони от повърхността на загнетите електроди и се облекчава запалването на лампата [19,27].

В стандартните луминесцентни лампи с подгряващи електроди съдържанието на живак е около 30 mg във вид на капки. Съвременните луминесцентни лампи от тип T5 имат по-малко количество живак – 3 mg. Като инертен газ се използва аргон. Инертният газ е с налягане (330 ÷ 400) Pa. Разрядът по време на работа протича при наситени живачни пари. По време на работа на лампата, живакът се намира едновременно във вид на течност и на пари. По време на работа на лампата, електрическият ток на дъгата загрява малък участък от електрода до около 1 100 °C, като положението непрекъснато се изменя по протежение на спиралата.

Луминофорите определят спектъра на луминесцентната лампа. Те трябва да са устойчиви на химическо въздействие на живачните пари и да не влизат във взаимодействие с материала на колбата и електродите. Лу-

минофорите трябва да се нанасят равномерно върху стените на колбата и да се задържат здраво за тях, както и да имат стабилни параметри при съхраняване и работа на ЛЛ. Луминофорите не трябва да са токсични. Като луминофори се използват различни силикати, волфрамити, фосфати и др., активирани с метални примеси, като манган и антимон. Поради изискването за екологичност, енергийна ефективност и висок общ индекс на цветопрераждане ($R_a \geq 80$), понастоящем Европейският съюз забранява използването на халофосфати за луминофор на тръбните ЛЛ.

Луминофорите трябва да имат максимална спектрална чувствителност, съвпадаща с максимума на спектралната интензивност на излъчване на възбуждащото излъчване.

Балансът на излъчване на луминесцентната лампа се разпределя по следния начин: 2 % във видимо излъчване; 38 % в термично; 60 % в ултравиолетово монохроматично с резонансна линия на живака $\lambda = 253,7 \text{ nm}$. Невидимото излъчване се абсорбира от луминофорния слой, който го трансформира във видимо излъчване (фиг. 10.1). При вложена енергия за луминесцентна лампа 25 % се преобразува във видимо излъчване и 75 % в топлинно [27].

б) Схеми на включване на луминесцентни лампи

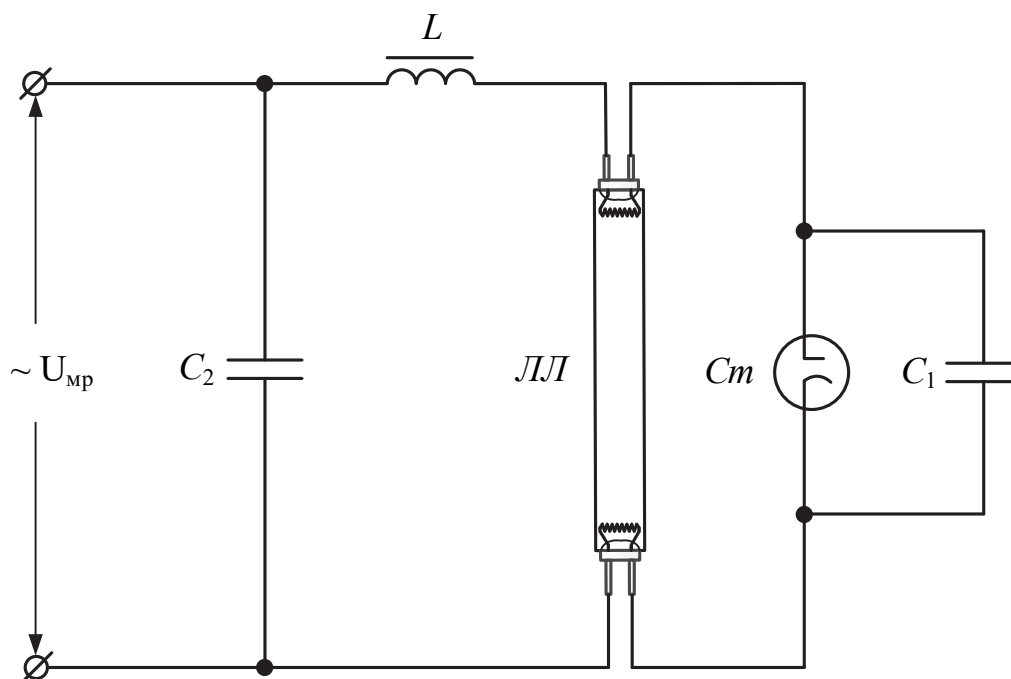
Луминесцентната лампа има нелинейна волт-амперна характеристика (фиг. 8.6), като в зоната на дъговия разряд тя е "падаща", т.е. след запалване на дъгата токът би се увеличавал неконтролирано до нейното изгаряне. Поради това ЛЛ не се свързва директно към електрическата мрежа, а винаги с последователно свързано баластно съпротивление, ограничаващо тока.

Включването на лампата се осъществява с помощта на пусково-регулираща апаратура (ПРА), която създава необходимите условия за нейното запалване и за поддържането на електрически разряд с определени параметри [19]. Схемите на ПРА се класифицират в зависимост от вида на баластното съпротивление и начина на запалване на луминесцентната лампа. Като баластно съпротивление най-често се използва индуктивно съпротивление – електромагнитен дросел, тъй като относителните активни загуби на мощност са значително по-малки в сравнение с тези при активен или активно-капацитивен баласт, а условията за запалване и работа на лампата са най-благоприятни.

В зависимост от начина на запалване на луминесцентната лампа схемите се разделят на стартерни и безстартерни. Последните от своя страна се подразделят на схеми с бързо и мигновено запалване. Безстартерните схеми не се разглеждат, тъй като днес почти не се използват. Причините за това са в сравнително големия разход на метал и по-големите загуби на мощност и енергия в сравнение със стартерните схеми.

На фиг. 10.2 е показана еднолампова стартерна схема с индуктивен баласт (дросел) за включване на луминесцентна лампа. Последователно на

луминесцентната лампа (*ЛЛ*) се включва дросел *L*, който изпълнява функцията на индуктивен баласт. Паралелно на лампата се включва стартер (*Ст*) с тлеещ разряд. Единият от електродите на стартера е изпълнен във вид на огъната биметална пластина. Колбата на стартера е запълнена с инертен газ (най-често неон). При включването на лампата в електрическата мрежа възниква тлеещ разряд само в стартера, тъй като разстоянието между неговите електроди е много по-малко от разстоянието между електродите на лампата. Напрежението на запалване на тлеещия разряд на стартера U_z е по-малко от напрежението на електрическата мрежа U_{mp} , но по-голямо от напрежението на лампата U_l .



Фиг. 10.2. Еднолампова стартерна схема с индуктивен баласт

Токът на тлеещия разряд е с малка големина ($20 \div 40$) mA и не може да загрее значително електродите на лампата. Периодът на тлеещия разряд е от 1 s до 3 s. Отделената топлина от тлеещия разряд обаче загрява електродите на стартера, като биметалната пластинка се огъва и допира другия електрод. Докато контактите на стартера са свързани накъсо, през електродите на лампата преминава пусков ток, който е ($1,5 \div 1,7$) пъти по-голям от номиналния ток на лампата. Периодът на контакт на електродите на стартера е от 0,2 s до 0,6 s. В резултат на това те се нагряват до ($800 \div 900$) °C и възниква термиемисия, която увеличава рязко броя на електроните в лампата. Постепенно електродите на стартера се охлаждат и биметалната пластинка прекъсва веригата. Периодът на отделяне на контактите на стартера е приблизително 0,1 ms. Тъй като във веригата е включен последователно дроселът *L*, неговият пад на напрежение се сумира с мрежовото напрежение и на електродите на лампата се подава повишено напрежение,

около (500 ÷ 1 500 V). Под неговото действие, в наситената от предходните етапи с токоносители среда, се поучава пробив между електродите от двете страни на лампата, между които се запалва електрическа дъга, в която възниква електрическият разряд, предизвикващ електролуминесценция в живачните пари и процесът на запалване на лампата е завършен [6,19,27].

Кондензаторът C_1 , обикновено намиращ се в корпуса на стартера, служи за намаляване на радиосмущенията при запалване на лампата. Освен това той оказва влияние на характера на преходния процес и улеснява запалването на лампата.

Естественят фактор на мощността ($\cos \varphi$) на луминесцентната лампа в индуктивна схема на включване е $\cos \varphi = 0,50 \div 0,60$ (много нисък) и за да се подобри се включва кондензаторът C_2 (фиг. 10.2.).

Предимствата на стартера са неговото просто устройство и ниска цена. Недостатъците са нестабилност на параметрите:

- поради малката продължителност на контактуване на стартера не винаги електродите на лампата се нагряват до температурата, която осигурява нейното запалване и това води до няколкократно опити за запалване (от 2 до 5 пъти), което причинява намаляване на трайността на ЛЛ;

- контактите на стартера може да се заварят, в резултат на което ЛЛ няма да се запали;

- разстоянието между контактите на стартера може да се промени и напрежението на запалване на стартера може да стане равно или по-малко от напрежението на лампата, в резултат на което баластното съпротивление се претоварва, а ЛЛ непрекъснато ще се запалва и изгасва, докато не изгори;

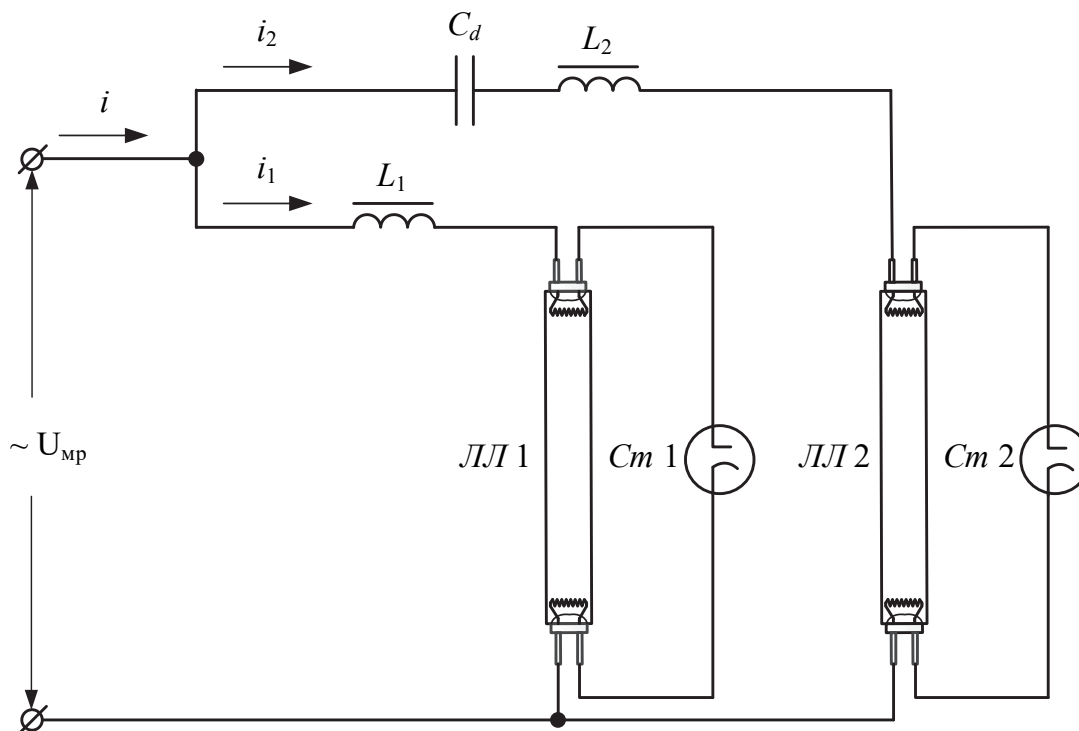
- ако импулсът от стартера няма достатъчно енергия или недостатъчно са се нагрили електродите на лампата, при подаване на импулса тя няма да се запали.

На фиг. 10.3 е показана т.нар. стартерна „дуо-схема“ на свързване на две луминесцентни лампи при еднофазно захранване.

Предимството на стартерната „дуо-схема“ на включване е, че се намаляват значително пулсациите на светлинния поток на лампите и се повишава факторът на мощността.

Едната лампа, ЛЛ 1, е свързана в индуктивна схема чрез дросел L_1 и следователно токът i_1 изостава от напрежението на ъгъл 60° . Другата лампа, ЛЛ 2, е свързана към мрежата чрез дефазиращ кондензатор C_d и дросел L_2 , чиито капацитет C_d и индуктивност L_2 се определят чрез съотношението $\frac{1}{\omega C_d} = 2\omega L_2$ (където $\omega = 2\pi f \approx 314 \text{ s}^{-1}$ – кръгова честота – при честота на електрическата мрежа $f = 50 \text{ Hz}$). В капацитивната верига се получава изпреварване на тока i_2 спрямо напрежението с 60° . В този случай кондензаторът C_d трябва да е оразмерен за напрежение, два пъти по-голямо от U_{mr} . В този случай се получава $\cos \varphi = 0,90 \div 0,95$. Факторът на мощността е по-

малък от единица поради изкривяване на синусоидалната форма на напрежението и отчасти на тока.



Фиг. 10.3. Стартерна „дуо-схема“ на включване на две ЛЛ

Електронната пусково-регулираща апаратура (ЕПРА) измества конвенционалните схеми на включване на ЛЛ с дросел и стартер. Съвременните луминесцентните лампи от тип Т5 работят само с ЕПРА.

в) Основни параметри на луминесцентни лампи

Електрическите параметри са мощност на лампата P_l и напрежение на лампата U_l , напрежение на запалване U_z , ток на подгряване на електродите в режим на запалване, работен ток i_l на ЛЛ и напрежение на мрежата $U_{мр.}$, подавано на пусково-регулиращата апаратура.

Луминесцентните лампи са предназначени да работят с променливо напрежение и ток с честота 50 Hz, но при използване на ЕПРА лампите работят при повишена честота (в зависимост от мощността на ЛЛ и вида на електронния баласт, най-често между $(25 \div 60)$ kHz). За постоянен ток не намират широко приложение, тъй като електродите на ЛЛ не работят в еднакъв режим и анодът се прегрява [27].

Луминесцентните лампи се произвеждат в широка гама от мощности: 3, 4, 6, 8, 11, 13, 14, 15, 18, 20, 25, 35, 36, 40, 58 W и др. Напрежението на запалване на ЛЛ е по-високо от напрежението на мрежата и се осигурява от ПРА. Обикновено се избира $U_l = (0,5 \div 0,65) U_{мр.}$, за да се осигури устойчив режим на работа на ЛЛ.

Мощността на ЛЛ се определя от работния ток i_l и напрежението на лампата U_l със следния израз:

$$P_l = U_l i_l \cos \varphi, \quad (10.1)$$

където $\cos \varphi$ – фактор на мощност на схемата с ЛЛ и ПРА и се определя от вида на ПРА.

Най-важните светлотехнически параметри на ЛЛ са светлинен поток на лампата Φ_l , корелирана цветна температура T_{cp} и общ индекс на цвето-предаване R_a . За номинален светлинен поток се приема този, който ЛЛ има след 100 h работа. Повърхността на ЛЛ не е с еднаква яркост по нейната дължина. Установено е от експериментални изследвания, че:

$$\Phi_l = 9,25 I_0, \quad (10.2)$$

където I_0 – интензитет на светлината, измерван напречно на лампата.

От израз (10.2) може да се определи средната яркост L_{cp} на ЛЛ:

$$L_{cp} = \frac{10^4 \Phi_l}{9,25 k d_1 b_c}, \quad (10.3)$$

където: d_1 – вътрешен диаметър на тръбата, в [cm]; b_c – дължина на светещата част на тръбата, в [cm]; k – коефициент, отчитащ неравномерното разпределение на яркостта по дължината на светещата част на лампата ($k = 0,87$ за ЛЛ с $P_l = 15$ W; $k = 0,92$ за ЛЛ с $P_l = (18 \div 58)$ W) [23,27].

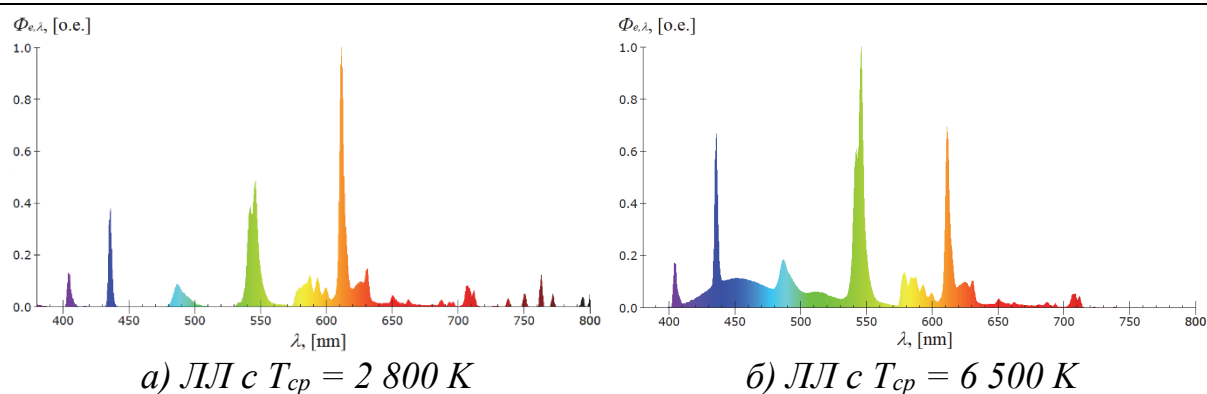
Средната яркост на ЛЛ е $L_{cp} = (4 \div 8) \cdot 10^3$ cd/m², като зависи от типа и мощността на лампата.

Спектърът на луминесцентните лампи е линеен, тъй като те са разрядни светлинни източници, при които електрическата дъга се наблюдава в инертни газове и живачни пари.

В зависимост от състава на луминофорния слой е възможно получаване на светлина с различно спектрално разпределение и различна корелирана цветна температура. На фиг. 10.4 е показано спектралното разпределение на лъчистия поток $\Phi_{e,\lambda}$ (в относителни единици) на две ЛЛ, имащи различен спектрален състав и корелирана цветна температура T_{cp} .

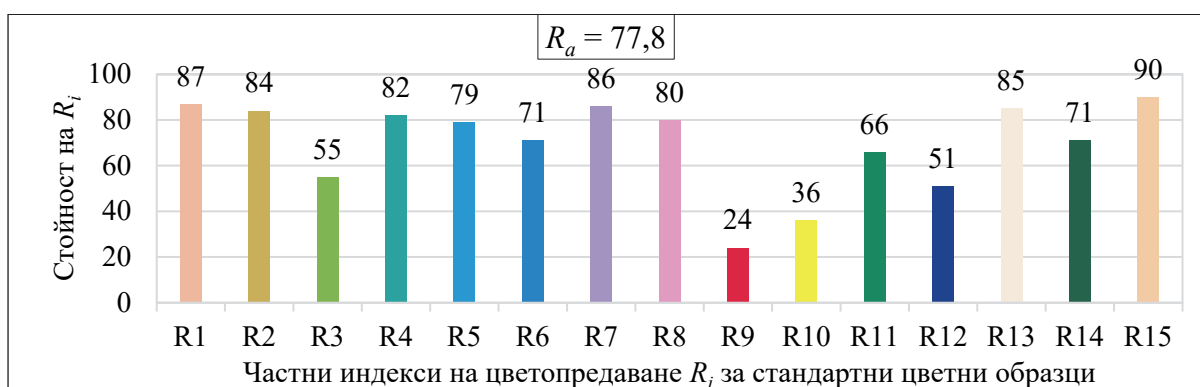
В зависимост от спектралния състав стандартните ЛЛ могат да се подразделят на четири основни вида [22,27,90]:

- ЛЛ с топло бяла светлина (ТБС) с $T_{cp} = (2\,800 \div 3\,200)$ K;
- ЛЛ с неутрална бяла светлина (БС) с $T_{cp} = 4\,000$ K;
- ЛЛ със студено бяла светлина (СБС) с $T_{cp} = (4\,200 \div 12\,000)$ K;
- ЛЛ с дневна светлина (ДС) с $T_{cp} = 6\,500$ K.



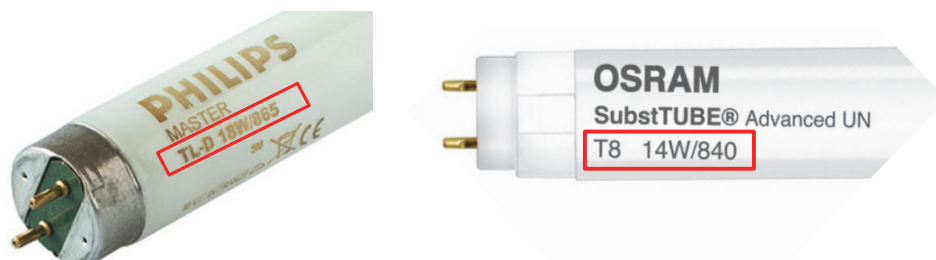
Фиг. 10.4. Измерени спектри на излъчване на луминесцентни лампи

Общият индекс на цветопредаване на обикновената луминесцентна лампа е в интервала $R_a = 75 \div 80$ – по-нисък от нажежаемата и нажежаемата халогенна лампа, тъй като има линеен спектър, в който липсват някои нюанси на цветовете. На фиг. 10.5 са показани измерени частните индекси на цветопредаване R_i за 15 стандартни цветни образци и изчислен общ индекс на цветопредаване R_a на луминесцентна лампа със студено бяла светлина с мощност 21 W.



Фиг. 10.5. Частни индекси R_i и общ индекс на цветопредаване R_a на ЛЛ

Съвременните луминесцентни лампи от тип T5 имат подобрени спектрални характеристики на луминофора, в резултат на което те имат по-висока стойност на общия индекс на цветопредаване – $R_a = 85$.



Фиг. 10.6. Код за обозначаване на типа, мощността, общия индекс на цветопредаване и корелираната цветна температура на ЛЛ

Някои производители (PHILIPS, Osram и др.) обозначават върху външната страна на стъклената тръба на луминесцентната лампа код, който показва типа, мощността, общия индекс на цветопрераждане и корелирана цветна температура на лампата (фиг. 10.6). Трицифреният код след наклонената линия показва цветовите характеристики: първата цифра - десетиците на индекса на цветопрераждане ($xxW/8xx - R_a \geq 80$; $xxW/9xx - R_a \geq 90$), а втората и третата – хилядите и стотиците на цветната температура ($xxW/x27 - T_{cp} = 2\,700K$; $xxW/x65 - T_{cp} = 6\,500K$ и т.н.).

Примери за кодове върху тръбата на ЛЛ и тяхното значение:

- 36W/830 – мощност на лампата $P_L = 36\text{ W}$, общ индекс на цветопрераждане $R_a \geq 80$, корелирана цветна температура $T_{cp} = 3\,000K$ (топла);
- 14W/840 – мощност на лампата $P_L = 14\text{ W}$, общ индекс на цветопрераждане $R_a \geq 80$, корелирана цветна температура $T_{cp} = 4\,000K$ (неутрална);
- 18W/865 – мощност на лампата $P_L = 18\text{ W}$, общ индекс на цветопрераждане $R_a \geq 80$, корелирана цветна температура $T_{cp} = 6\,500K$ (дневна).

Светлоотдаването η на луминесцентната лампа и ПРА се определя с израза:

$$\eta = \frac{\Phi_L}{P_L + \Delta P_{ПРА}}, \quad (10.4)$$

където $\Delta P_{ПРА}$ – загуби на активна мощност в ПРА. За ЛЛ с конвенционална ПРА с индуктивен баласт (дросел) $\Delta P_{ПРА} = (0,25 \div 0,30)P_L$; за ЛЛ с ЕПРА $\Delta P_{ПРА} = (0,05 \div 0,10)P_L$.

Светлоотдаването на конвенционалните луминесцентни лампи от тип Т8 и Т12 е $\eta \approx 70\text{ lm/W}$, докато ЛЛ тип Т5 имат значително по-високи стойности – $\eta = (89 \div 104)\text{ lm/W}$. С луминесцентни лампи Т5 се постига по-голяма икономия на електрическа енергия за осветление [1,27].

Светлинният поток намалява по време на работа на луминесцентните лампи. След 10 000 h работа светлинният поток на ЛЛ от тип Т8 и Т12 намалява между 20 % и 30 %, докато при ЛЛ от тип Т5 намалението е значително по-малко – само 5 %. Следователно експлоатационният фактор на осветителни уредби с лампи Т5 трябва да се избира от проектантите със значително по-високи стойности, т.е. степента на преоразмеряване на инсталираната електрическа мощност е значително по-малка.

Съществено влияние върху продължителността на работа на луминесцентната лампа оказват експлоатационните условия – продължителност на работния цикъл, вид и параметри на ПРА, коефициент на формата на тока, изменение на напрежението (от номиналното за ЛЛ), температура и влажност на околната среда и др. Средната продължителност на работа на ЛЛ от тип Т8 и Т12 е в границите $t_{cp} = (7\,500 \div 13\,000)\text{ h}$, докато ЛЛ тип Т5 имат по-голяма трайност – $t_{cp} = 16\,000\text{ h}$.

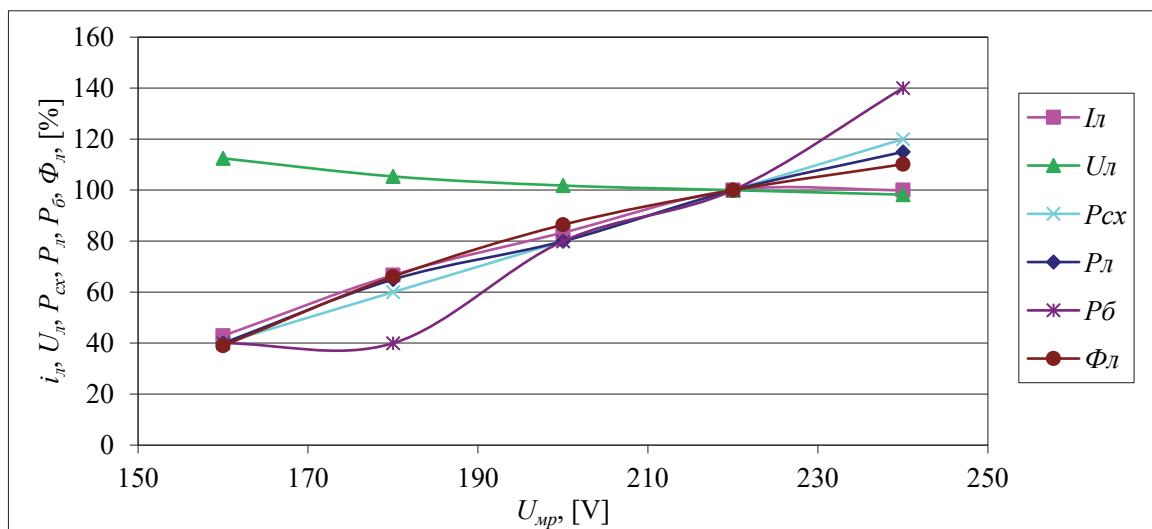


Фиг. 10.7. Зависимост на трайността на ЛЛ от продължителността на работния цикъл

Продължителността на работния цикъл влияе върху живота на ЛЛ. При по-често включване трайността на лампата се намалява, тъй като износването на активния слой на волфрамовите електроди е най-интензивно по време на включване и запалване на лампата, когато и токът е най-голям. Обикновено средната продължителност на работа t_{cp} на лампата се определя за продължителност на работ-

ния цикъл $t_p = 3$ h [19]. На фиг. 10.7 е показана графично зависимостта на трайността от продължителността на работния цикъл на ЛЛ – $t_{cp} = f(t_p)$.

Увеличаването и намаляването на напрежението съкращава живота на ЛЛ. Намаляването на напрежението влошава запалването на лампата, а увеличаването води до увеличаване на работния ток през лампата. На фиг. 10.8 са показани в графичен вид зависимостите на тока на лампата i_l , напрежението на лампата U_l , мощността на схемата P_{cx} , мощността на лампата P_l , мощността на баласта P_b и светлинния поток на лампата Φ_l в [%] от изменението на напрежението на мрежата U_{mr} , подавано към схемата на луминесцентна лампа с мощност 40 W с дросел.



Фиг. 10.8. Зависимост на основните параметри на луминесцентната лампа от изменението на напрежението на мрежата

Температурата на околната среда влияе върху работата на ЛЛ. При температура на околната среда ≤ 0 °C, ЛЛ не може да се запали или процесът става трудно. Съгласно нормите и стандартите ЛЛ се запалват при

температура на околната среда ($5 \div 50$) °C; за открити лампи извън осветителя, оптималната околна температура е 20 °C [27].

Табл. 10.1. Сравнение на основните параметри на ЛЛ от типове T8 и T5

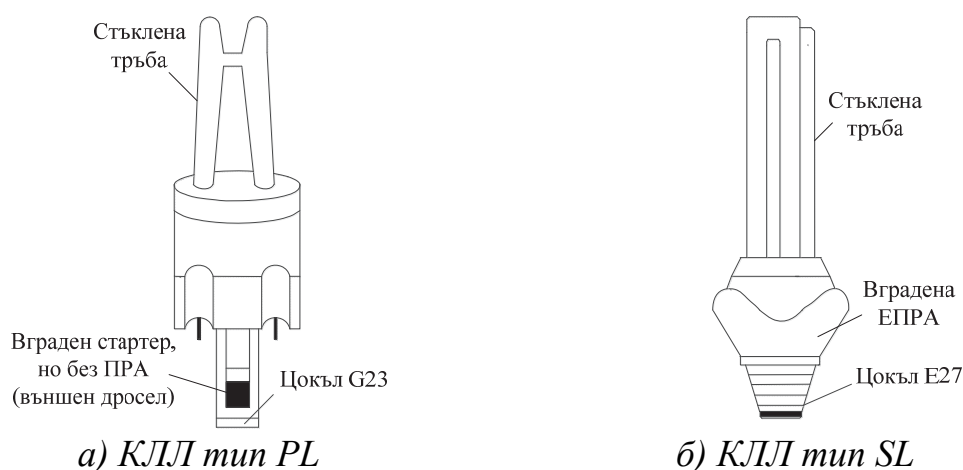
Тип на ЛЛ	T8		T5	
Мощност P_L , [W]	18	36	14	35
Светлинен поток Φ , [lm]	1 150	2 850	1 350	3 650
Светлоотдаване η , [lm/W]	64	79	96	104
Общ индекс на цветоотдаване R_a	70 ÷ 80		80 ÷ 90	
Трайност t_{cp} , [h]	8 000 ÷ 13 000		16 000 ÷ 18 000	
Намаляване на Φ след 40 % от t_{cp} , [%]	20		5	

Сравнение на основните параметри на луминесцентни лампи от типове T8 и T5 с $T_{cp} = 4\,000$ K е представено в табл. 10.1.

Преди разпространението на светодиодите, луминесцентните лампи се използваха масово в помещения на учебни и административни сгради, търговски обекти, здравни заведения, хотели и др.

10.2. Компактна луминесцентна лампа

Компактната луминесцентна лампа (КЛЛ) е разновидност на луминесцентната лампа. Основната разлика е в по-компактната форма на стъклената тръба. По-малкият размер на луминесцентната тръба на КЛЛ се получава чрез създаване на няколко участъка, огънати и свързани по специална технология. Тръбата на КЛЛ съдържа луминофор от редки метали, които могат да работят при по-висока повърхностна плътност на излъчване, отколкото стандартните луминесцентни лампи, което позволява тръбата да е с по-малък диаметър. Съдържането на живак е 15 mg. Като инертен газ най-често се използва аргон. Инертния газ е с налягане около 400 Pa.



Фиг. 10.9. Класификация на компактни луминесцентни лампи

Компактните луминесцентни лампи могат да се класифицират конструктивно в следните видове:

- тип PL (фиг. 10.9a) – с външен дросел и вграден стартер със специален цокъл G23 (при 4-пинов цокъл е необходим и външен стартер); разрядната тръба е с H- или П-образна форма;

- тип SL (фиг. 10.9б) – с вградена ЕПРА, най-често в цокъл E27 или E14; разрядната тръба има по-сложна форма;

- кръгообразни с вградена ПРА и стартер.

Електрическите, светлотехническите и експлоатационните характеристики на КЛЛ съответстват на стандартните ЛЛ със същата мощност, но габаритите са два пъти по-малки, което дава възможност да се разработят по-малогобаритни осветители.

Средната продължителност на работа на КЛЛ за денонощен работен цикъл $t_p = 3 \text{ h}$ е $t_{cp} = 8\,000 \text{ h}$. Светлинният поток след 2 000 h работа намалява между 20 % и 30 %, а в края на живота – с 50 %.

Светлоотдаването на КЛЛ е в интервала $\eta = (50 \div 70) \text{ lm/W}$, което е по-ниско от това на стандартната ЛЛ, тъй като при огънатата луминесцентна тръба на КЛЛ се получава самозасенчване на част от собственото излъчване.

Преди масовото разпространение на светодиодите, компактните луминесцентни лампи се използват в административни и жилищни сгради като по-енергийно ефективни в сравнение с нажежаемите лампи.

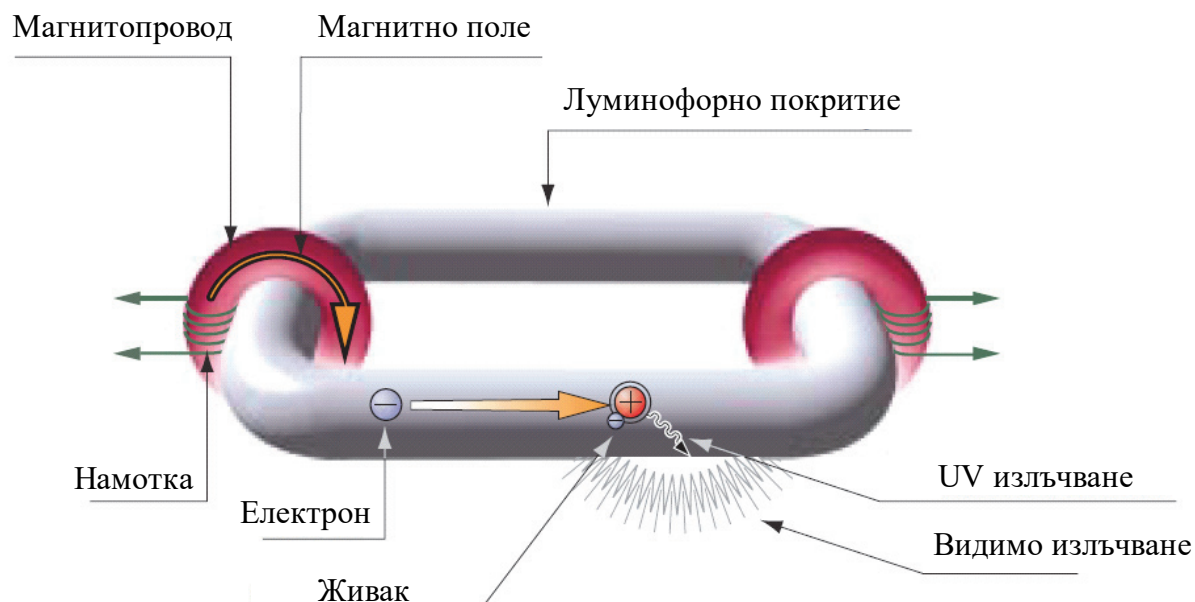
10.3. Индукционна лампа

Индукционната лампа (ИЛ), наричана още безелектродна лампа, е разрядна лампа, чиито принцип на работа се основава на разряд в газова среда посредством високочестотно електромагнитно поле.

Устройството на индукционната лампа е показано на фиг. 10.10. За възбуждане и излъчване във видимата област на луминофора се използва разряд в пари на живак в смес от инертни газове (аргон и криптон), както при луминесцентните лампи. В индукционната лампа вместо дъгов има вихров разряд. Поддържането на разряда се осъществява с високочестотно електромагнитно поле, създавано в близост до разрядния обем. За разлика от луминесцентните и компактните луминесцентни лампи, индукционната лампа няма вътрешни електроди. Липсата на вътрешни електроди е причина индукционната лампа да има много голяма трайност, която се ограничава от преобразувателя. Тръбата (колбата) се изработва от стъкло или кварц.

Независимо от различните конструкции (фиг. 10.11), индукционните лампи имат един и същ принцип на работа. Свързването на лампата към електрическата мрежа (230 V/50 Hz) се осъществява чрез електронен преобразувател, осигуряващ висока честота (от 250 kHz до 100 MHz). Преобразувателят може да бъде направен като отделно устройство или да бъде разположен в корпуса на лампата. Вихровият разряд в лампата се постига без електроди, тъй като енергията се осигурява от високочестотното магнитно поле. Магнитното поле се създава в два магнитопровода (или един

централен при конструкцията на фиг. 10.11-дясно), върху които е разположена намотка с определен брой навивки, а вихровият разряд в газа изпълнява функцията на вторична навивка (системата наподобява трансформатор) (фиг. 10.10) [38,73].



Фиг. 10.10. Устройство на индукционна лампа



Фиг. 10.11. Различни конструкции на индукционна лампа

Основните параметри и характеристики на индукционната лампа са:

- разпространени мощности на лампата: 100 W и 150 W;
- светлинен поток $\Phi \leq 12\,000\text{ lm}$;
- общ индекс на цвето предаване $R_a = 80$;
- корелирана цветна температура $T_{cp} = (3\,000 \div 6\,500)\text{ K}$;
- светлоотдаване $\eta = 80\text{ lm/W}$;
- изключително голяма продължителност на работа: $t_{cp} = 60\,000\text{ h}$;
- липса на забележими пулсации на светлинния поток в резултат на високата честота;

- могат да предизвикват електромагнитни смущения (новите лампи използват нискочестотни преобразуватели, които имат сертификат за електромагнитна съвместимост).

Индукционните лампи могат да се използват за приложения, при които смяната на лампите увеличава значително разходите за поддръжка – например осветяване на тунели, помещения с много високи тавани и труден достъп на монтаж и др.

11. ЖИВАЧНА ЛАМПА С ВИСОКО НАЛЯГАНЕ

11.1. Устройство на живачна лампа с високо налягане

Живачната лампа с високо налягане (ЖЛВН) принадлежи към групата на разрядните светлинни източници с високо налягане. Устройството на живачна лампа с високо налягане е показано на фиг. 11.1 [73].



Фиг. 11.1. Устройство на живачна лампа с високо налягане

Разрядната тръба (горелка) е изработена от прозрачно кварцово стъкло, която е монтирана в труднотопима стъклена колба (външна). След като се изтегли въздухът от разрядната тръба, в нея се вкарва аргон до налягане 2,66 kPa и точно дозирано количество живак. Аргонът служи за облекчаване на запалването на разряда и защитава електродите от разрушаване в началния стадий на разгарянето.

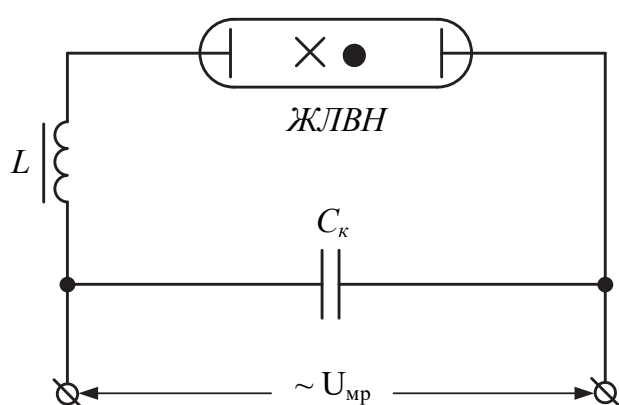
Външната колба е изготвена от магнезиево стъкло и има елипсоидна или цилиндрична форма. За отвеждане на отделената топлина от разрядната тръба външната колба е напълнена с топлопроводен газ (азот) под налягане 66,5 kPa, което при работа на лампата достига 10^5 kPa. Вътрешната повърхност на стъклената колба може да бъде покрита с тънък слой луминофор. Цоклите на лампата обикновено са E27 и E40.

Двата главни електрода, разположени в долния и горния край на разрядната тръба, представляват волфрамова пръчица, върху която е нанесена оксидна паста, като отгоре е навита плътно в спирала в няколко слоя волфрамова жичка. Оксидната паста улеснява запалването на дъгата. Помощните електроди могат да бъдат един или два, също са изработени от волфрам и разположени на разстояние $(1 \div 2)$ mm от главните електроди. Всеки от тях е свързан с противоположния главен електрод през черно графитно съпротивление със стойност $(10 \div 20)$ k Ω . Връзката на електродите с цокъла на лампата става като преминаването през стената на разрядната тръба се изпълнява обикновено с молибденово фолио с широчина 4 mm и дебелина $(10 \div 30)$ mm [19,27].

11.2. Схема на включване на живачна лампа с високо налягане

Живачната лампа с високо налягане, като разряден светлинен източник, има „падаща“ волт-амперна характеристика в работната си зона с дъгов разряд и необходимост от баласт за ограничаване на тока (фиг. 8.6).

За ограничаване на тока на лампата и стабилизиране на режима на работа, последователно на лампата в електрическата схема най-често се включва баластно съпротивление, дросел с индуктивност L (фиг. 11.2). За



Фиг. 11.2. Схема на включване на живачна лампа с високо налягане

повишаване на фактора на мощността на електрическата схема ($\cos \varphi \geq 0,90$) допълнително се включва компенсиращ кондензатор C_k .

Напрежението на електрическата мрежа $U_{мр}$, което се подава на главните електроди при включване на лампата, не е достатъчно за запалване на разряд между тях. Първоначално възниква само тлеещ разряд между близко разположените главни и помощни елект-

роди, който йонизира газа в разрядната тръба. По този начин се създават условия за възникване на разряд между главните електроди. Отделяната от разряда топлина повишава температурата на лампата и постепенно живакът се изпарява. В продължение на няколко минути налягането на живачните пари в разрядната тръба достига своята нормална стойност, при която

ламбата излъчва максимален светлинен поток. Продължителността на периода на разгаряне е $(2 \div 5)$ min. Работната температура на външната колба на ЖЛВН с мощност 250 W достига 300 °C, а температурата на стените на разрядната тръба е 800 °C [27].

Дъговият разряд при нормална работа на ламбата се основава главно на термична йонизация. Електродите се загряват до висока температура в резултат на интензивното бомбардиране с йони и електрони. Ако ламбата се изключи и включи отново към мрежата, разрядът между главните електроди не се възстановява веднага. Налягането в разрядната тръба е твърде високо, за да възникне ударна йонизация, а температурата на електродите е недостатъчна за термична йонизация. Затова е необходимо в продължение на 5 min ламбата да се охлади, за да бъде възможно нейното повторно запалване [19].

11.3. Основни параметри и приложение на живачна лампа с високо налягане

Мощността на живачни лампи с високо налягане най-често е: 50, 80, 125, 250, 400 (по-рядко 700, 1 000 и 2 000) W. Основните параметри на ЖЛВН са дадени в табл. 11.1 [19].

Табл. 11.1. Основни параметри на живачни лампи с високо налягане

Мощност на ламбата, [W]	50	80	125	250	400	700
Загуби в дросела, [%]	22	13	10	10	7	6
Светлинен поток на ламбата без луминофор, [lm]	-	3 100	5 600	11 500	21 000	-
Светлинен поток на ламбата с луминофор, [lm]	1 900	3 500	6 250	13 500	23 000	42 000

Яркостта на ЖЛВН без луминофор е $(170 \div 640)$ kcd/m² – много голяма; за ЖЛВН с луминофор яркостта е по-малка – $(20 \div 30)$ kcd/m².

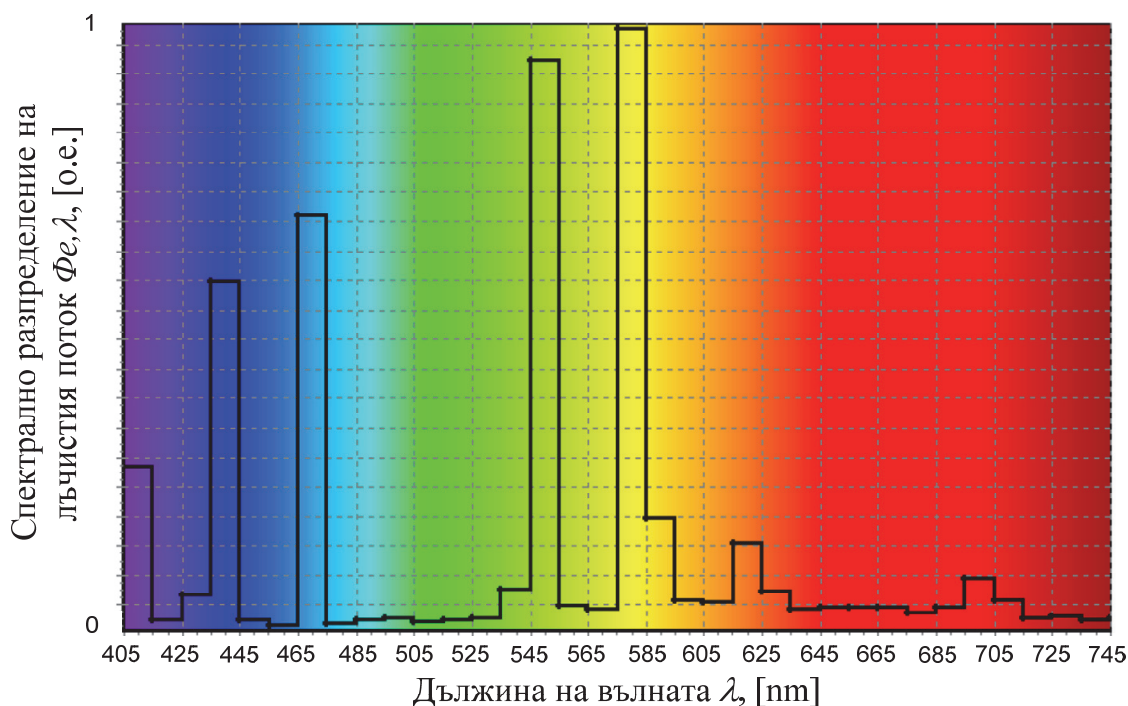
Спектърът на живачните лампи е линеен, тъй като те са разрядни светлинни източници, при които електрическата дъга се наблюдава в инертни газове и живачни пари. Спектралният състав на ЖЛВН зависи от налягането, големината на тока през ламбата и наличието на луминофор.

При увеличаване на налягането и големината на тока на ЖЛВН без луминофор част от резонансните линии се разширяват симетрично в двете страни, а друга част асиметрично към дълговълновата част на спектъра. Поради липсата на линии в областта на дългите вълни светлината има синьозелен цвят и общият индекс на цвето предаване е нисък – $R_a = 45$.

За подобряване на цвето предаването се използват ЖЛВН с нанесен луминофорен слой от вътрешната повърхност на външната колба. Те се наричат живачни лампи с коригиран спектър. Спектралното разпределение

на светлинния поток на живачната лампа с коригиран спектър е значително по-благоприятно от това на дъговия разряд и светят с приемлив бял цвят, но светлоотдаването е по-ниско в сравнение с ЖЛВН без луминофор. На фиг. 11.3 е показано спектралното разпределение на лъчистия поток $\Phi_{e,\lambda}$ (в относителни единици) на ЖЛВН с луминофор с мощност 250 W.

Корелираната цветна температура на живачна лампа с високо налягане обикновено е в границите $T_{cp} = (4\,000 \div 6\,000)$ K.



Фиг. 11.3. Спектрално разпределение на ЖЛВН с луминофор

Светлоотдаването на живачните лампи с високо налягане е ниско за този тип светлинни източници – $\eta = 60$ lm/W, а с отчитане на загубите в дросела – $\eta = 57$ lm/W.

Средната продължителност на работа на живачните лампи с високо налягане е $t_{cp} = (5\,000 \div 9\,000)$ h. В края на експлоатационния срок на ЖЛВН светлинният поток намалява с 30 % от номиналния [19,27].

Повишаването на напрежението над номиналното на ЖЛВН съкращава продължителността ѝ на работа, тъй като се получава рекристализация на кварцовата разрядна тръба, настъпват необратими химични процеси и електродите се износват.

Околната температура влияе на работата на ЖЛВН. При отрицателна околна температура запалването на ЖЛВН е затруднено поради намаляване на налягането на живачните пари и запалването протича в аргонови пари, при което е нужно по-високо напрежение в сравнение с живачните пари. При околна температура 25 °C напрежението на запалване е ≤ 180 V; при отрицателна околна температура, то се увеличава на 250 V.

Съгласно „Директива 2002/95/ЕО“ и Регламент на Европейския парламент и на Съвета относно ограничаването на определени опасни вещества в електрическото оборудване, от 2015 г. се забранява използването на живачни лампи с високо налягане за общо осветление.

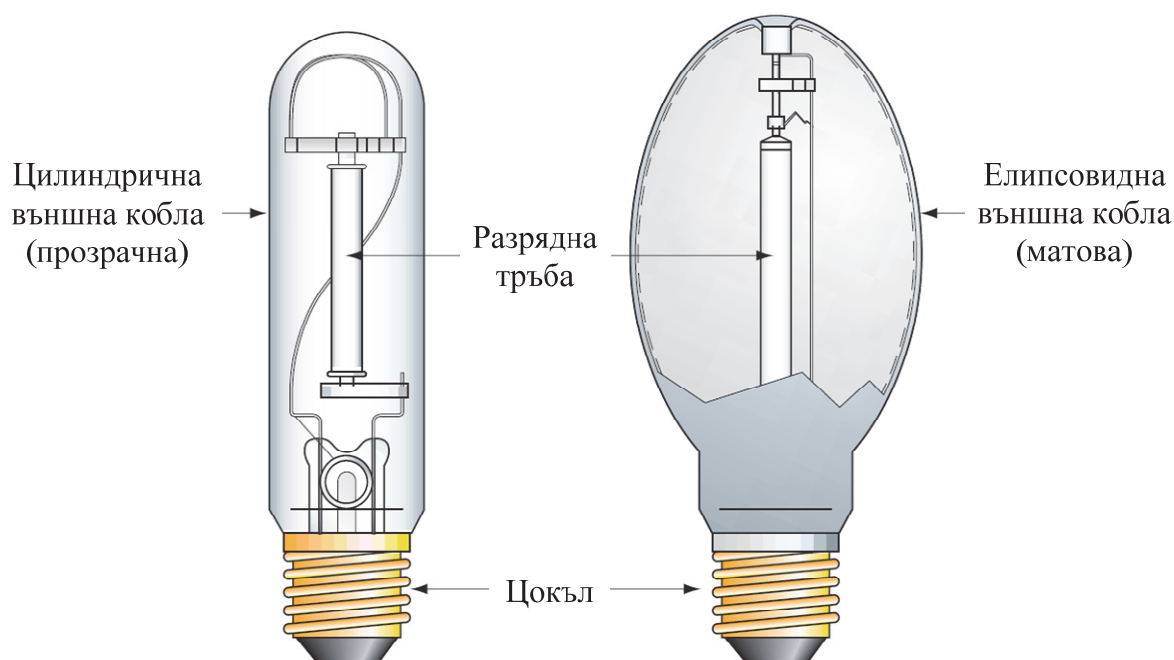
Преди да бъдат забранени, живачните лампи с високо налягане се използваха във външното и уличното осветление, в промишлените цехове (с височина на окачване над 6 m).

12. НАТРИЕВА ЛАМПА С ВИСОКО НАЛЯГАНЕ. НАТРИЕВА ЛАМПА С НИСКО НАЛЯГАНЕ

12.1. Натриева лампа с високо налягане

а) Устройство на натриева лампа с високо налягане

Натриевата лампа с високо налягане (НЛВН) принадлежи към групата на разрядните светлинни източници с високо налягане. Устройството на натриева лампа с високо налягане е показано на фиг. 12.1 [73].

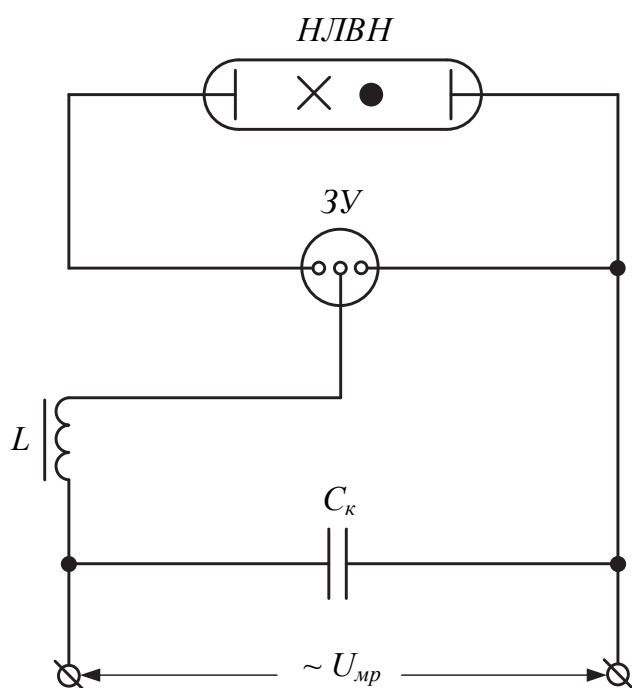


Фиг. 12.1. Устройство на натриева лампа с високо налягане

Разрядната тръба е изработена от поликристален окис на алуминий (Al_2O_3), монтирана в прозрачна или матова стъклена колба с цилиндрична или елипсовидна форма. Матовата колба се използва в случаите, когато се цели да се намали яркостта на лампата. Като матово покритие от вътрешната страна на колбата се използва дифузен слой от бял прах, а не специален люминофор, тъй като лампата не излъчва в ултравиолетовата област. Кристалната структура на окиса на алуминия изключва обикновената форма на въвеждане на волфрамовите електроди от разрядната тръба към зах-

ранването. Не може да се използва разрядна тръба от кварц или стъкло, тъй като температурата на натриевите пари е над $700\text{ }^{\circ}\text{C}$. В колбата е създаден вакуум за да се осигури поддържане на постоянна температура на разрядната тръба, независимо от промяната на температурата на околната среда. В разрядната тръба има натриеви пари с високо налягане ($13,3 \div 33,25$) kPa, както и инертен газ (ксенон или аргон) и живак. Функцията на живака е да увеличи налягането в разрядната тръба и напрежението на лампата до работни стойности. Функцията на ксенона (или аргона) е да намали топлинните загуби и да повиши светлоотдаването на лампата [19,27,77].

б) Схема на включване на натриева лампа с високо налягане



Фиг. 12.2. Схема на включване на натриева лампа с високо налягане

Натриевата лампа с високо налягане, има „падаща“ волтамперна характеристика в работната си зона с дъгов разряд и необходимост от баласт за ограничаване на тока (фиг. 8.6). За ограничаване на тока на лампата и стабилизиране на режима на работа, в електрическата схема (фиг. 12.2) се включва дросел с индуктивност L . В схемата на НЛВН е включено запално устройство (ЗУ), което осигурява запалването чрез кратковременен импулс ($2,5 \div 4$) kV с продължителност ($1 \div 2$) μs . За повишаване на фактора на мощността на електрическата схема ($\cos \varphi \geq 0,90$) допълнително се включва кондензатор C_k . Пусковият ток е

50 % по-голям от номиналния. Продължителността на разгаряне на НЛВН след запалване е ($5 \div 10$) min – по-голяма от тази на ЖЛВН. След изключване НЛВН могат бързо да се запалят след ($1 \div 2$) s след изключването, докато парите на натрия са все още концентрирани.

Характеристиките на дросела определят работните характеристики на натриевата лампа с високо налягане. Индуктивното съпротивление трябва да е точно избрано за съответната мощност лампа. Не се допуска отклонение на импеданса с повече от $\pm 2\%$. Освен това е препоръчително дроселът да има вграден термичен ограничител, поради изправителния ефект на лампата и последващото увеличаване на тока и температурата в дросела. Температурата на изключване е $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ [27,85].

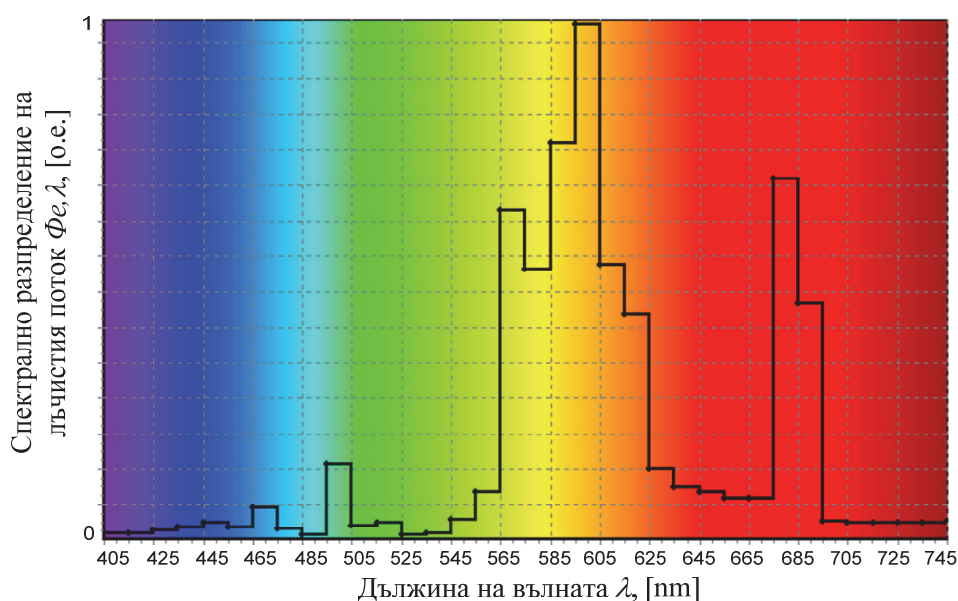
в) Основни параметри и приложение на натриева лампа с високо налягане

Най-разпространените мощности на натриевите лампи с високо налягане са: 35, 50, 70, 100, 150, 250 и 400 W. Основните мощности и съответният им светлинен поток на НЛВН са дадени в табл. 12.1.

Спектърът на натриевите лампи с високо налягане е линеен, тъй като те са разрядни светлинни източници. При по-високо налягане на натрия се наблюдава разширяване на излъчването в дълговълновата област от видимия спектър. При налягане 31,2 kPa спектърът е почти непрекъснат с преобладаващо излъчване в жълтата област от видимия спектър [27]. На фиг. 12.3 е показано спектралното разпределение на лъчистия поток $\Phi_{e,\lambda}$ (в относителни единици) на НЛВН (с прозрачна колба) с мощност 250 W.

Табл. 12.1. Основни параметри на натриева лампи с високо налягане

Мощност на лампата, [W]	50	70	100	150	250	400
Светлинен поток на лампата, [lm]	4 400	5 600	10 700	17 200	26 500	50 000



Фиг. 12.3. Спектрално разпределение на НЛВН

Корелираната цветна температура на натриевите лампи с високо налягане е в границите $T_{cp} = (2\,000 \div 2\,200)$ K.

Общият индекс на цвето предаване е сравнително нисък - $R_a \approx 25$.

Светлоотдаването на натриевите лампи с високо налягане е най-високо от всички разрядни лампи – $\eta = 100 \div 130$ lm/W.

Светлоотдаването, корелираната цветна температура и общият индекс на цвето предаване намаляват с намаляване на мощността на лампата.

Средната продължителност на работа на натриевите лампи с високо налягане е сравнително висока – $t_{cp} = (10\,000 \div 24\,000)$ h.

НЛВН имат ниска чувствителност към изменението на околната температура и могат да работят в стабилно състояние от $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

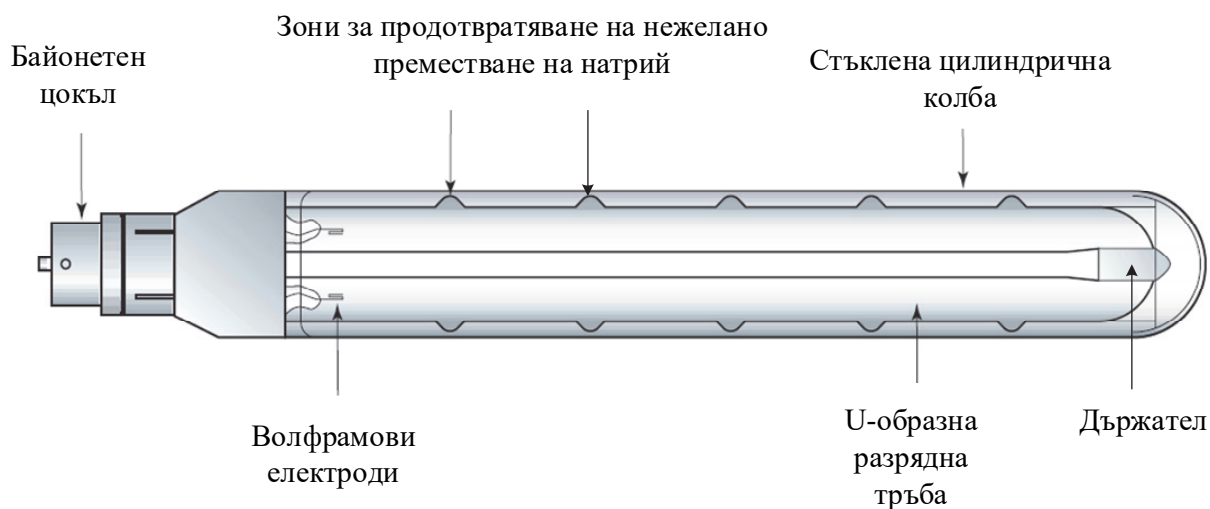
Захранващото напрежение от мрежата $U_{\text{мр}}$ оказва силно влияние върху големината на тока, мощността, светлинния поток и цветовете характеристики на НЛВН. Производителите на този тип лампи препоръчват допустимото изменение на мрежовото напрежение да не превишава $\pm 5\%$.

Преди появата на светодиодите, НЛВН се използваха във външно и улично осветление, в тунели и железопътни гари. Поради лошото цветопрераждане, приложението на НЛВН във вътрешното осветление е ограничено само за помещения без зрителни задачи с точно разпознаване на цветове - леярски и ковашки цехове, монтаж на едро габаритни детайли и др.

12.2. Натриева лампа с ниско налягане

а) Устройство на натриева лампа с ниско налягане

Натриевата лампа с ниско налягане (НЛНН) също принадлежи към групата на разрядните светлинни източници. Тя се състои от разрядна тръба, поставена в стъклена цилиндрична колба с вакуум (фиг. 12.4).



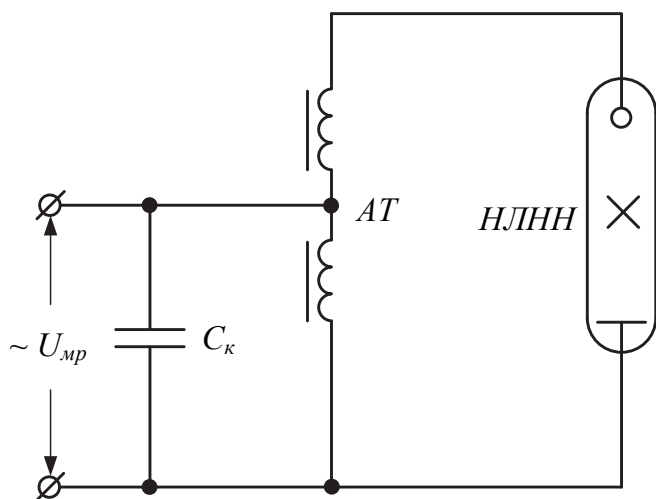
Фиг. 12.4. Устройство на натриева лампа с ниско налягане

Формата на разрядната тръба обикновено е U-образна (позволява да се намали дължината на лампата) и по-рядко права. В краищата на разрядната тръба са разположени волфрамови електроди, покрити с термоемисионен материал, предотвратяващ разпрашването им по време на работа. НЛНН има един байонетен цокъл. За да се предотврати нежелано преместване на натрий, по дължината на разрядната тръба има издатини. Разположението на лампата по време на работа трябва да бъде хоризонтално, тъй като при накланяне кондензираните капки натрий се разпределят неравномерно и се намалява светлоотдаването [19,27,73].

Оптималното налягане на натриевите пари е $0,4\text{ Pa}$ при работна температура в разрядната тръба $260\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тази температура трябва да се под-

държа постоянна по време на работа, тъй като светлоотдаването зависи от нея. Затова между колбата и разрядната тръба е създаден вакуум, а върху вътрешната повърхност на колбата е нанесен слой от индиев оксид, пропускащ видимите и отразяващ инфрачервените лъчи и допълнително ограничаващ охлаждането на натриевите пари. Освен натрий, в разрядната тръба се въвежда и инертен газ, обикновено неон, с налягане 1,33 kPa.

б) Схема на включване на натриева лампа с ниско налягане



Фиг. 12.5. Схема на включване на натриева лампа с ниско налягане

Включването на натриевата лампа с ниско налягане към електрическата мрежа се осъществява чрез трансформатор с разсейване (АТ), който се използва за запалване и ограничаване на големината на тока (фиг. 12.5). Напреженивият импулс е от порядъка на 600 V. В схемата се използва и компенсиращ кондензатор C_k за подобряване на фактора на мощността. В по-новите схеми на НЛНН се използват височестотни ЕПРА и два вида

баласти: дросел с или без стартер и комбинация от дросел и трансформатор със задължително използване на стартер. Вторият тип баласт осигурява постоянна мощност на лампата по време на нейния срок на експлоатация.

При запалване на лампата дъговият разряд се осъществява в неонова среда и има червен цвят. След като лампата се нагрее и се повиши налягането на парите на натрия, дъговият разряд преминава в натриеви пари. За понижаване на напрежението на запалване на лампата към неона се прибавя около 1 % аргон [27]. Продължителността на разгаряне на НЛНН след запалване е 10÷12 min – най-голяма от всички видове разрядни лампи.

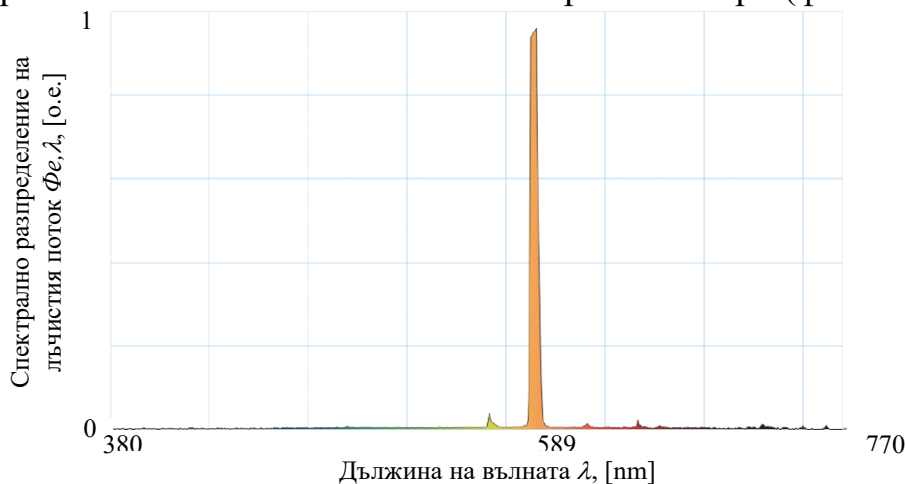
в) Основни параметри и приложение на натриева лампа с ниско налягане

Разпространените мощности на натриевите лампи с ниско налягане са: 18, 35, 55, 66, 90, 131, 135 и 180 W. Основните мощности и съответният им светлинен поток на НЛНН са дадени в табл. 12.2 [19].

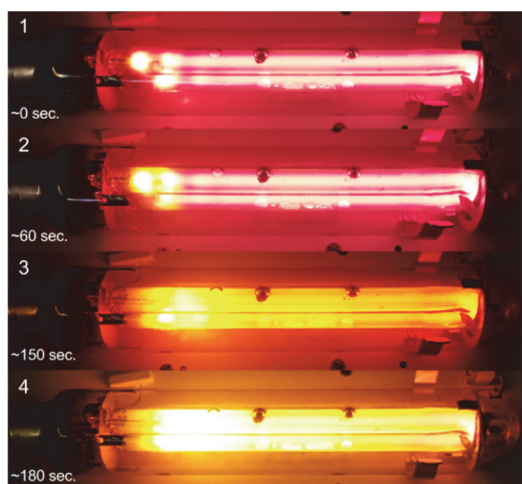
Табл. 12.2. Основни параметри на натриеви лампи с ниско налягане

Мощност на лампата, [W]	35	55	90	135	180
Светлинен поток на лампата, [lm]	4 600	7 600	12 500	21 500	31 500

Спектърът на НЛНН е почти монохроматичен, а цветът на бялата светлина е златисто жълт (фиг. 12.6). Причината за това е в тясната спектрална линия на излъчване на натриевите пари с дължина на вълната $\lambda = (589,0 \div 589,6) \text{ nm}$. По време на разгаряне на лампата червеното излъчване от неона премива в жълто излъчване на натриевите пари (фиг. 12.7).



Фиг. 12.6. Спектрално разпределение на НЛНН



Фиг. 12.7. Разгаряне на НЛНН

Корелираната цветна температура на натриевите лампи с ниско налягане е $T_{cp} = 1\,800 \text{ K}$ – най-ниска от всички разрядни лампи.

В резултат на монохроматичното излъчване на НЛНН общият индекс на цвето предаване е $R_a = 0$ – най-нисък от всички видове лампи.

Светлоотдаването на натриевите лампи с ниско налягане е до $\eta = 190 \text{ lm/W}$ – най-високо от всички видове разрядни лампи. Причината за това е, че излъчването на натриевите пари е

монохроматично с $\lambda = 586,9 \text{ nm}$ и има висока относителна спектрална светлинна ефективност за фотопично зрение – $V_{\lambda=586,9 \text{ nm}} = 0,76$.

Средната продължителност на работа на НЛНН е $t_{cp} \approx 10\,000 \text{ h}$.

Захранващото напрежение U_{mr} не оказва съществено влияние върху тока, мощността и светлинния поток на НЛНН [27,76]. Например при изменение на напрежението с $\pm 10 \%$, мощността и светлинният поток на лампата се променят приблизително с $\pm 5 \%$.

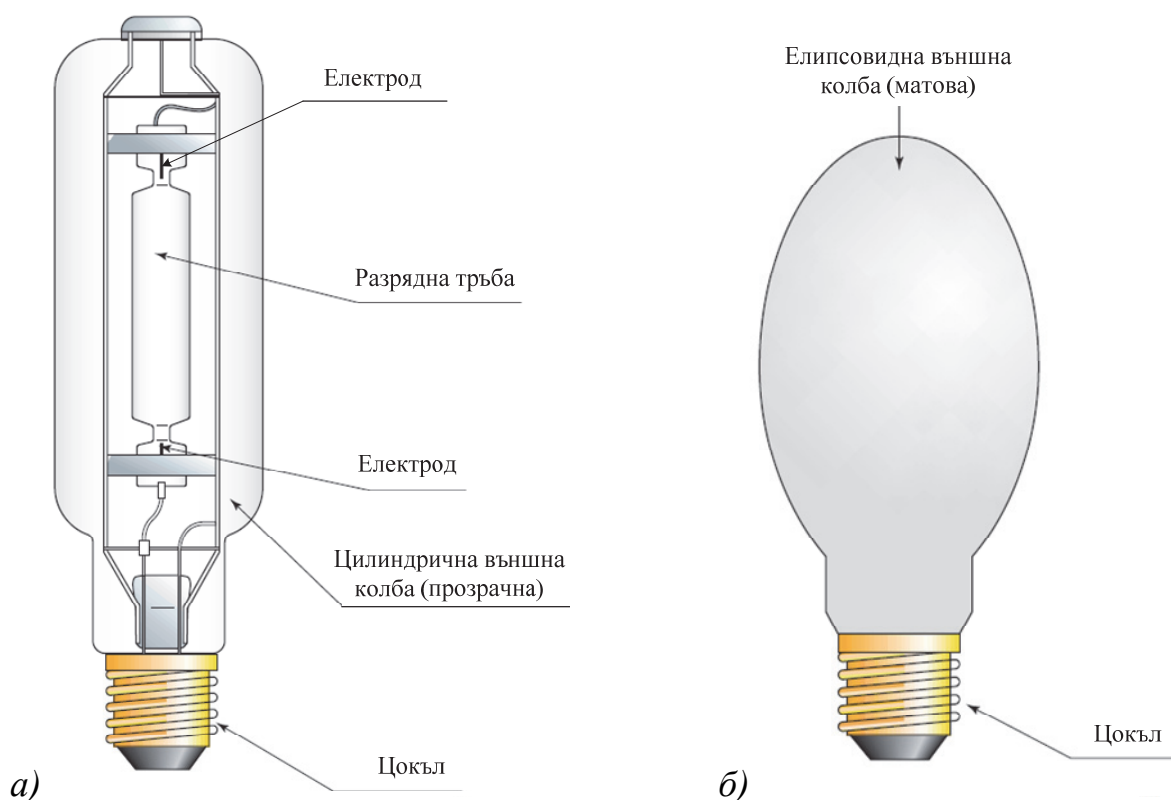
В днешно време натриевите лампи с ниско налягане почти не се използват. В миналото тези лампи намират ограничено приложение поради лошото си цвето предаване. Монохроматичната жълта светлина е благоп-

риятна за получаване на висока острота на зрението и за видимост на микро-грапавини, затова НЛНН понякога се използват за осветление на помещения за качествен контрол на метални или стъклени отливки и изделия, по чиито повърхности трябва да се установят евентуални пукнатини, резки, шупли и др.

13. МЕТАЛХАЛОГЕННА ЛАМПА С ВИСОКО НАЛЯГАНЕ

13.1. Устройство на металхалогенна лампа с високо налягане

Металхалогенната лампа с високо налягане (МХЛ) принадлежи към групата на разрядните светлинни източници с високо налягане. Устройството на МХЛ е показано на фиг. 13.1 [73].



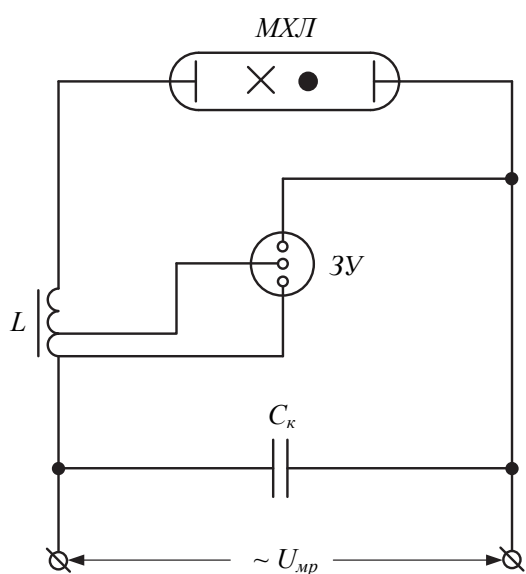
Фиг. 13.1. Устройство на металхалогенна лампа с високо налягане

Разрядната тръба може да бъде кварцова или керамична. Тя е монтирана в прозрачна колба с цилиндрична форма (фиг. 13.1а) или в матова колба с елипсовидна форма (фиг. 13.1б). Използването на разряд в метални пари при производството на лампи е ограничено, тъй като е необходимо твърде висока температура, която разрядната тръба не издържа. Освен това металът въздейства на силикатните тръби и ги разрушава. Тези проблеми се решават, като вместо чисти метали се използват техните *халогениди* или химични елементи на халогенните елементи (йод, бром, хлор и др.). Температурата на изпаряване на халогенидите е много по-ниска от тази на

чистия метал [27]. Чрез подходящ подбор на халогениди с различни спектрални линии на излъчване, при МХЛ се получава много добро покритие на всички цветови зони от видимия спектър, с което се постига по-високо цветопрераждане в сравнение с останалите видове разрядни лампи.

В разрядната тръба на МХЛ освен аргон и живак се въвежда и определено количество халогенни съединения: йодид на натрий, литий, талий, индий, скандий, торий и др. В зоната на разряда халогенидите се разделят на халоген + метал. Атомите на метала при висока температура се възбуждат и излъчват характерния за тях спектър. При въвеждане на повече метал във вид на халогениди се получава необходимият спектър на разряда – от линейен до непрекъснат. При температури на стената на външната колба ($1\ 050 \div 1\ 150$) К, налягането на парите на халогенидите на много метали е значително по-високо спрямо самите метали, което създава в разрядния канал необходимата концентрация на атомите на метал, които излъчват спектъра [23,27]. Излъчването почти напълно се реализира от атомите на метала, защото те имат по-нисък потенциал на излъчване спрямо живака.

13.2. Схема на включване на металхалогенна лампа с високо налягане



Фиг. 13.2. Схема на включване на МХЛ с високо налягане

Металхалогенната лампа с високо налягане, като разряден източник, има “падаща” волт-амперна характеристика в зоната с дъгов разряд и необходимост от баластно съпротивление за ограничаване на тока на дъгата (фиг. 8.6). За ограничаване на тока на лампата и стабилизиране на режима на работа, в електрическата схема (фиг. 13.2) се включва дросел с индуктивност L .

За повишаване на фактора на мощността на електрическата схема ($\cos \varphi \geq 0,90$) допълнително се включва кондензатор C_k . Продължителността на разгаряне на МХЛ след запалване е $4 \div 5$ min. Пусковият ток е около 50 % по-

голям от номиналния. Повечето МХЛ позволяват повторно запалване веднага след изключване, ако в схемата на ПРА се осигури високоволтов импулс с големина ($35 \div 60$) kV. В противен случай, МХЛ трябва да се охладят между ($4 \div 15$) min преди да бъдат включени отново [73].

Създаването на разряд с високо налягане от халогениди на метал има предимства и недостатъци [27]. Предимствата са следните:

- температурата на разрядния канал достига няколко хиляди градуса, достатъчна за пълна дисоциация на атомите на халогенидите на метал, за интензивно възбуждане на атомите на метала и др.;

- големият градиент на потенциала позволява да се конструират лампи с малки размери, но с голяма специфична мощност и габаритна яркост; добавката на един или няколко метала в халогенните съединения позволява излъчване с различни спектри, например: с добавка на натрий излъчването е жълто с доминантна дължина на вълната $\lambda = 589 \text{ nm}$; с добавка на литий излъчването е червено с $\lambda = 671 \text{ nm}$; с добавка на талий излъчването е зелено с $\lambda = 535 \text{ nm}$.

Недостатъците на халогенидите на метала при разряд са:

- повишава се необходимото напрежение на запалване, тъй като халогенните съединения попадат в активния слой на електродите. Атомите на халогенните елементи присъединяват към себе си електроните, което влошава образуването на нови заредени частици. В резултат на това в схемата е необходимо ЗУ, което да осигурява по-високо напрежение - с големина $(0,8 \div 5) \text{ kV}$ за начално запалване на дъгата;

- йодидите на метала предизвикват стягане на разряда, при което се нарушава стабилността на дъгата от стените на разрядната тръба.

13.3. Основни параметри и приложение на металхалогенната лампа с високо налягане

Разпространените мощности на металхалогенни лампи с високо налягане са в много широк диапазон: 35, 50, 70, 100W за вътрешно осветление; 150, 250, 400W – за спортно, индустриално и улично осветление; 1 000 2 000, 2 500, 3 000, 3 500 W – за спортно осветление на стадиони, летища и други открити обекти с повишени изисквания за цветоподаване. Основните мощности и съответният им светлинен поток са дадени в табл. 13.1.

Табл. 13.1. Основни параметри на МХЛ

Мощност, [W]	35	75	250	400	1 000	2 000	3 500
Светлинен поток, [lm]	3 400	5 500	20 000	38 000	88 000	240 000	320 000

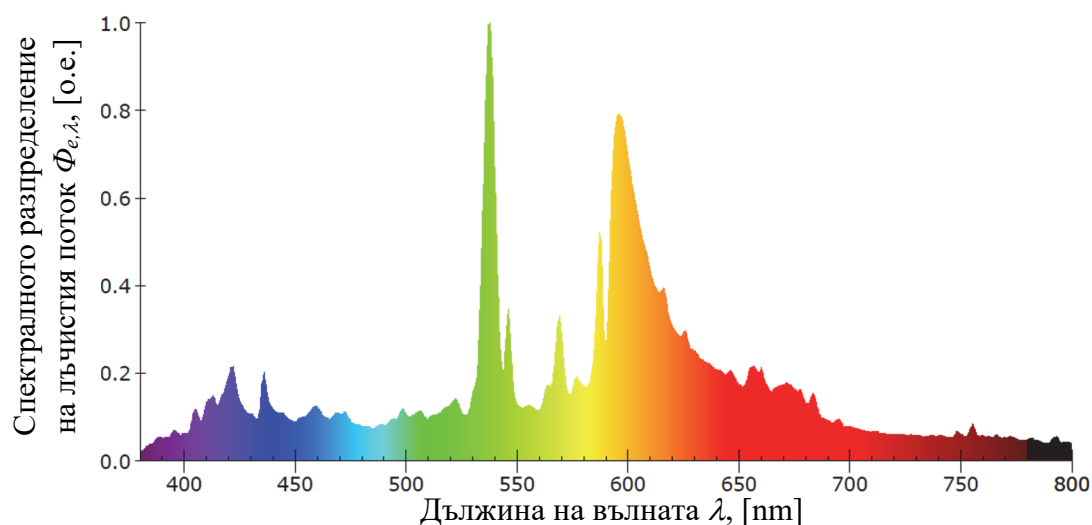
Спектърът на металхалогенните лампи с високо налягане е значително по-благоприятен от този на ЖЛВН, което се дължи на халогенните елементи в металните пари [19]. На фиг. 13.3 е показано спектралното разпределение на лъчистия поток $\Phi_{e,\lambda}$ (в относителни единици) на МХЛ (с цилиндрична прозрачна колба) с мощност 35 W.

Корелираната цветна температура на металхалогенните лампи с високо налягане е в границите $T_{cp} = (2\,900 \div 6\,500) \text{ K}$.

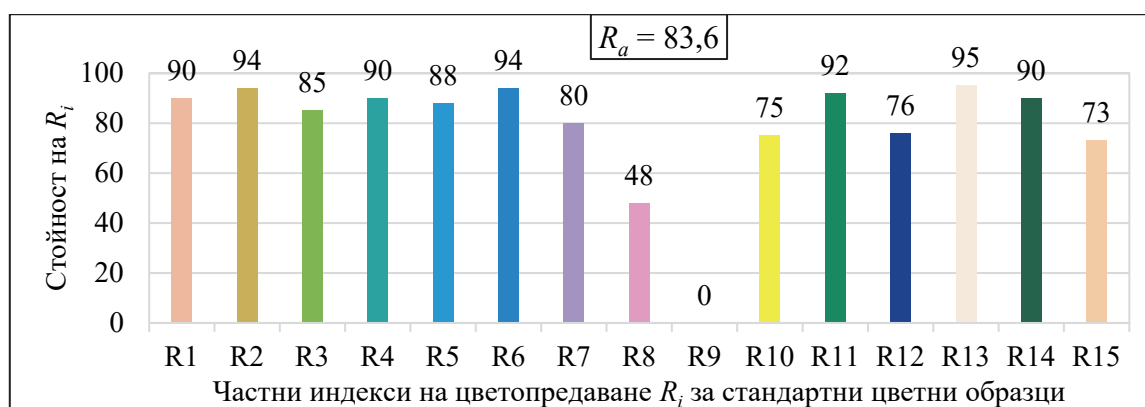
Общият индекс на цвето предаване е висок – $R_a = (80 \div 95)$. На фиг. 13.4 са показани частните индекси на цвето предаване R_i на МХЛ с цилиндрична прозрачна колба (35 W) за 15 стандартни цветни образци.

Светлоотдаването на МХЛ е в границите $\eta = (75 \div 110)$ lm/W – по-високо от ЖЛВН, но по-ниско от НЛВН.

Средната продължителност на работа на МХЛ е от 2 500 до 14 000 часа, като намалява с увеличаване на мощността: $t_{cp} = 14\,000$ h за мощност 35 W; $t_{cp} = 6\,000$ h за мощности (250 ÷ 400) W; $t_{cp} = 2\,500$ h за мощности (1 000 ÷ 2 000) W. Поради по-високата температура на работа на различните химични реакции средната продължителност на работа е по-малка от тази на ЖЛВН [27,73].



Фиг. 13.3. Спектрално разпределение на МХЛ



Фиг. 13.4. Частни индекси R_i и общ индекс на цвето предаване R_a на МХЛ

Захранващото напрежение от мрежата U_{mr} оказва влияние върху параметрите на МХЛ. При промяна на мрежовото напрежение U_{mr} в границите $\pm (10 \div 15)$ %, мощността се променя с $(22 \div 33)$ %, а светлинният поток с $(25 \div 33)$ % [6,27,28,29].

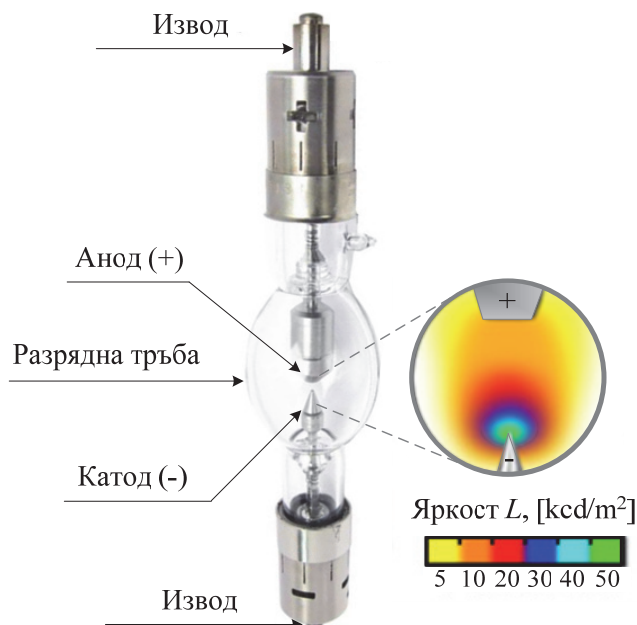
Поради доброто си цвето предаване, МХЛ се използват във външното и вътрешното осветление. Във външното осветление се използват за осве-

тяване на стадиони, представителни пространства, фасади, летища, индустриални зони на открито и др. Във вътрешното осветление се използват за осветяване на промишлени помещения, спортни зали, телевизионни и кино-снимачни студия. Днес, с навлизане на светодиодите, МХЛ постепенно излизат от употреба.

14. КСЕНОНОВА ЛАМПА

14.1. Устройство на ксенонова лампа

Основните елементи на ксеноновата лампа (КсЛ) са разрядна тръба, електроди и изводи. Разрядната тръба се изпълнява от кварцово стъкло в цилиндрична или сферична форма. Електродите на лампата се изработват от волфрам. На фиг. 14.1 е показано устройство на ксенонова лампа с високо налягане със сферична форма на разрядната тръба. Налягането на ксенона в лампите с цилиндрична форма на разрядната тръба обикновено е около 10^5 Pa , а в лампите със сферична форма на тръбата е по-високо – около $35 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. Поради високото налягане, ксеноновите лампи са взривоопасни, дори когато не работят. Затова се поставя защитно стъкло [19].



Фиг. 14.1. Устройство на ксенонова лампа и разпределение на яркостта в междueleктродното пространство

Мрежовото напрежение оказва силно влияние върху големината на тока и светлинния поток на ксеноновата лампа. При увеличаване на напрежението, лампата силно се прегрява и се съкращава продължителността ѝ на работа. Лампата се включва към електрическата мрежа еднофазно на 230V, без дросел, но със специално запално устройство – искров генера-

тор, който запалва ксеноновата лампа чрез генериране на високо напрежение импулс $\leq 50 \text{ kV}$ и след това поддържа захранването на дъгата с импулси с висока честота.

а) Цилиндрични ксенонови лампи

Разрядната кварцова колба на този тип лампи има цилиндрична (тръбна) форма. Цилиндричните ксенонови лампи са мощни източници с излъчване във видимата област, близка до ултравиолетовата и инфрачервената част на спектъра. Тези лампи се произвеждат с естествено и изкуствено охлаждане.

Цилиндричните ксенонови лампи се произвеждат основно с големи мощности $P_{\lambda} = (2 \div 100) \text{ kW}$. Яркостта на цилиндричните ксенонови лампи е $L = (1,5 \div 30) \text{ cd/m}^2$.

Светлоотдаването зависи от типа на охлаждане: при естествено охлаждане – $\eta = (20 \div 30) \text{ lm/W}$; при водно охлаждане – $\eta = (35 \div 45) \text{ lm/W}$.

Цилиндричните ксенонови лампи имат непрекъснат спектър и много добро цветоподаване.

Средната продължителност на работа е $t_{cp} \approx 5\,000 \text{ h}$.

Цилиндричните ксенонови лампи намират приложение при осветление на големи и открити промишлени пространства, рудници, спортни терени, архитектурни обекти, летища и др. Тези лампи се изместват първоначално от метал-халогенните лампи с високо налягане, а в последствие и от светодиодните лампи [2,19,22,27].

б) Сферични ксенонови лампи

Разрядната кварцова колба на този тип лампи има сферична форма (фиг. 14.1). Сферичните ксенонови лампи могат да имат големи и компактни размери. Тези лампи работят предимно на постоянен ток, тъй като при променлив ток дъгата в атмосферата на ксенона бързо разрушава волфрамовите електроди.

При захранване с постоянен ток, изменението на тока и интензитета на светлината в периода на разгаряне е много малко и на практика лампата няма период на разгаряне. Анодът (+) е изработен с по-големи размери от катода (-) (фиг. 14.1), тъй като анодът се нагрива от електронната бомбардировка и конвекционните потоци, а в същото време катодът се охлажда за сметка на електронната емисия. Разстоянието между анода и катода е малко – при малогабаритните лампи е $(0,2 \div 0,5) \text{ mm}$; за големите и по-мощни лампи е $(10 \div 12) \text{ mm}$ [27].

Работното положение на повечето сферични ксенонови лампи е вертикално, като анодът се намира отгоре, тъй като тогава конвективните потоци и потока на електрони от катода са в една посока и електрическата дъга е по-устойчива.

В по-голямата си част сферичните ксенонови лампи са с мощности $P_{\lambda} = (1 \div 10) \text{ kW}$. Яркостта на катода е много по-голяма от яркостта в центъра, както е показано на фиг. 14.1. При лампи с малко разстояние между електродите може да се получи много голяма яркост – $L \geq 10^3 \text{ Mcd/m}^2$.

Сферичните ксенонови лампи също имат непрекъснат спектър, който в зоната на видимите лъчи е подобен на спектъра на слънчевата светилна. Корелираната цветна температура е $T_{cp} = (6\,100 \div 12\,000) \text{ K}$. Цветопредаването на тези лампи е много добро, като общият индекс на цветопредаване е $R_a = (95 \div 98)$ – най-висок от всички разрядни лампи.

От цялата мощност излъчването е 40 %, като 35 % във видимата част, 56 % в инфрачервената и 9 % в ултравиолетовата. Светлоотдаването зависи от мощността: за сферични лампи с малка мощност – $\eta = 30 \text{ lm/W}$; за голяма мощност $\eta = 50 \text{ lm/W}$.

Сферичните ксенонови лампи се използват в кинопрожекционни апарати, имитатори на слънчево излъчване, уредби за заваряване и работни пространства, изискващи висока яркост, качествено цветопредаване и мигновено включване [27]. Тези лампи също се заменят изцяло със светодиодните.

в) Автомобилни ксенонови лампи

Електрозахранването на автомобилните ксенонови лампи се извършва със специална ЕПРА (фиг. 14.2). Първоначално към лампата се подава напреженов импулс 25 kV, а след това се поддържа напрежение 80 V с честота 300 Hz.



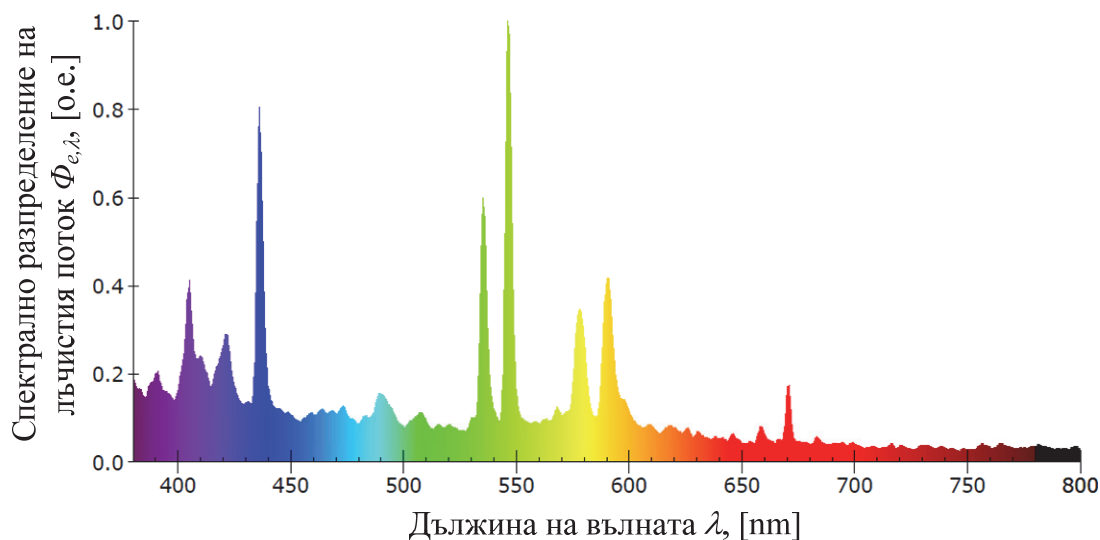
Фиг. 14.2. Автомобилна ксенонова лампа с ЕПРА

Автомобилните ксенонови лампи се произвеждат най-често с мощност 35 W и имат светлинен поток около 3 000 lm, докато автомобилните нажежаеми халогенни лампи с мощност 55 W имат 1 550 lm. Произвеждат

се и ксенонови лампи с мощност 60 W и светлинен поток 5 500 lm. Два пъти по-големия светлинен поток на КсЛ спрямо този на халогенните лампи помага на водачите да се подобри видимостта на пътя. Автомобилните ксенонови лампи са по-ефективни от автомобилните нажежаеми халогенни лампи: при мощност 35 W от ксеноновата лампа в топлина се превръща 7 % от енергията, докато при нажежаемата халогенна с мощност 55 W в топлина се преобразува 40 % от енергията [27]. Високата интензивност на светлинния поток на КсЛ се получава от светенето на газа, предизвикан от електрическата дъга между двата електрода.

Автомобилните КсЛ са устойчиви на вибрации, тъй като нямат нажежаема спирава, както халогенните, и това оказва влияние върху продължителността на работа. Средната продължителност на работа на автомобилните ксенонови лампи е $t_{cp} = (2\,800 \div 4\,000)$ h, докато трайността на автомобилните нажежаеми халогенни е $t_{cp} = (100 \div 500)$ h.

Корелираната цветна температура на произвежданите автомобилни ксенонови лампи е $T_{cp} = (4\,200 \div 6\,500)$ K. На фиг. 14.3 е показано спектралното разпределение на лъчистия поток $\Phi_{e,\lambda}$ (в относителни единици) на автомобилна ксенонова лампа с мощност 60 W и $T_{cp} = 6\,500$ K [91].



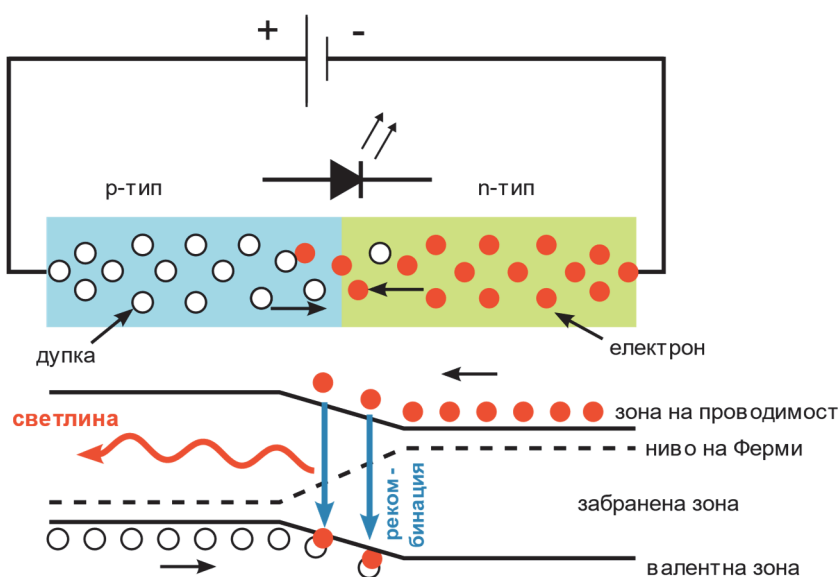
Фиг. 14.3. Спектрално разпределение на автомобилна ксенонова лампа

Различните модели на автомобилните ксенонови лампи са предназначени за конкретен тип на оптичната система на фаровете. Например ксенонови лампи тип „D2S“ са предназначени за фарове с оптична система с леци, докато ксенонови лампи от тип „D2R“ са предназначени за фарове с рефлекторна оптична система.

15. СВЕТОДИОД (LED). СРАВНЕНИЕ НА ОСНОВНИТЕ ПАРАМЕТРИ НА СВЕТЛИННИТЕ ИЗТОЧНИЦИ

15.1. Принцип на работа на LED

Светодиодите (LED - Light-Emitting Diode) произвеждат светлина чрез електролуминесценция, когато постоянен ток с ниско напрежение се приложи към подходящо легиран кристал, съдържащ p-n преход (фиг. 15.1). Обикновено се използват елементи от колона III и V на периодичната таблица на химическите елементи.



Фиг. 15.1. Принцип на работа на LED p-n преход

Когато протече ток в права посока, p-n преходът излъчва светлина с дължина на вълната, определена от енергийната зона на активната област. При протичането на тока, електроните се инжектират в p-областта. Излъчването на фотони светлина възниква в резултат на рекомбинация електрон-дупка в p-областта. Електронните енергийни преходи през енергийната зона, наречени радиационни рекомбинации, произвеждат фотони (т.е. светлина), докато шунтовите енергийни преходи, наречени нерадиационни рекомбинации, произвеждат фонони (т.е. топлина). Забранената зона E_g е разделението между зоната на проводимостта и валентната енергийна зона в полупроводниковия кристал. Характеристиките на забранената енергийна зона определят квантовата ефективност и излъчваните дължини на вълните на LED. Дължината на вълната на лъчистата енергия λ се дава по формула:

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E_g} \quad (14.1)$$

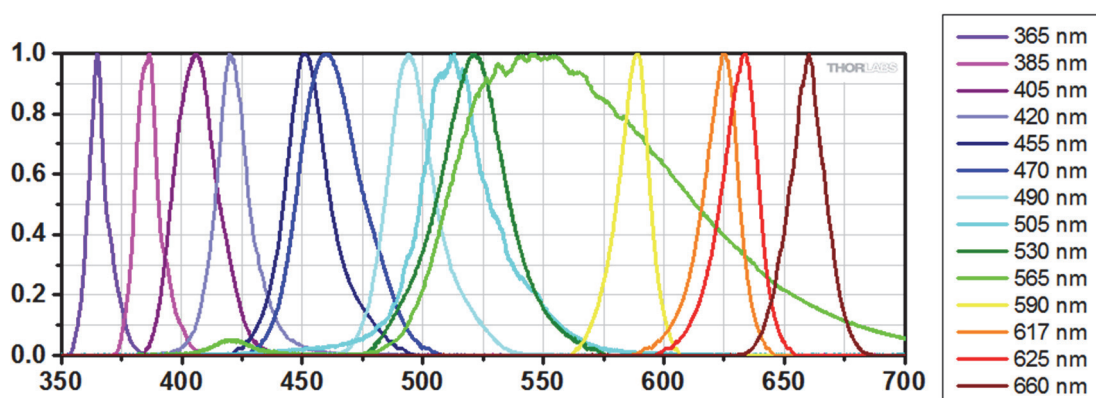
където h е константата на Планк, а c е скоростта на светлината. [83]

15.2. Устройство, принцип на работа, видове и основни параметри и характеристики на LED

Светодиодите са най-модерните и все още динамично развиващи се светлинни източници със значителни предимства пред останалите видове лампи, които им позволят да ги изместват и да се превърнат в основен източник на светлина за повечето видове съвременни осветителни уредби.

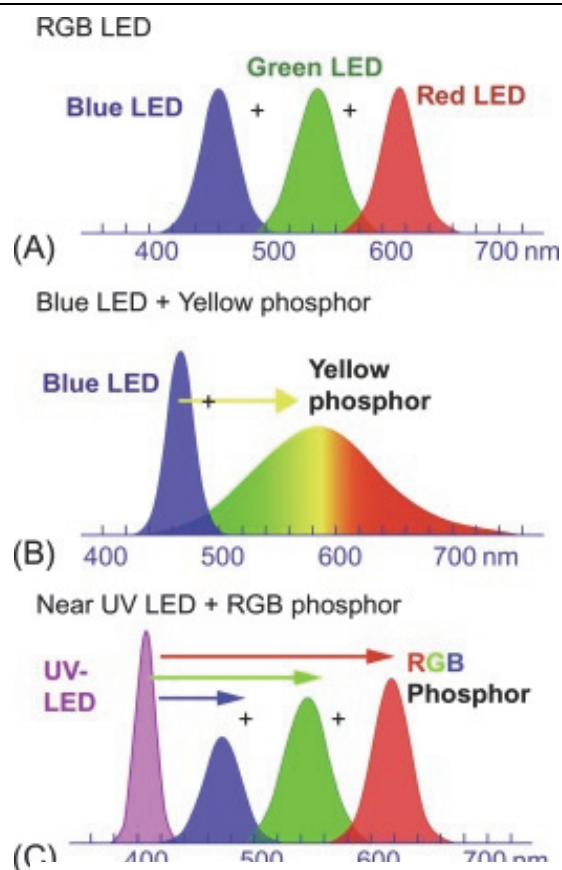
Въпреки, че са най-новата технология в осветлението, историческото начало на LED технологията започва преди повече от 100 години: 1907 г. - Хенри Раунд първи описва жълто, зелено и оранжево светене от твърдотелен диод; 1923 г. - Олег Лосев открива електролуминесценцията на полупроводниците; 1961 г. - Робърт Байард и Хари Питман патентоват технологията на инфрачервения светодиод; 1962 г. - Ник Холоняк - първият в света практически приложим светодиод с видима червена светлина; през 70-те години на миналия век са открити жълтите и зелените; 1972 г. - Джордж Крафорд изобретява първия жълт светодиод и подобрява 10 пъти яркостта на червените и червено-оранжеви светодиоди; 1994 - Шуджи Накамура представя първия син светодиод с висока яркост, разработен съвместно с Исама Акасаки и Хироши Амано. За откриването на високо ефективния син светодиод със сравнително ниска цена, чрез който за 20 години се променя революционно производството на дисплеи и осветителната техника, през 2014 г. тримата учени получават Нобелова награда за физика.

Както може да се види от историческото развитие, последователно са създавани светодиоди, излъчващи различни, почти монохроматични електромагнитни спектри (фиг. 15.2), с отсъствието на син светодиод до 1994 г., поради което не е било възможно да се получи линеен или непрекъснат спектър с бяла светлина и LED технологията да се използва за осветление.



Фиг. 15.2. Електромагнитни спектри на различни видове LED [111]

След откриването на мощния син светодиод, възможните технически решения и комбинации от монохроматични диоди и луминофори за получаване на бяла светлина значително се разширяват. Бяла светлина със светодиоди се постига чрез две основни производствени технологии:



Фиг. 15.3. Основни LED технологии.[80]

- комбиниране на светлинните спектри от електролуминесценция на светодиоди с различни цветове;

- комбинация от спектри на електролуминесценция на един вид светодиод с фотолуминесценция от луминофори.

Към настоящия момент в практиката се прилагат следните три основни конструктивни решения за получаване на бяла светлина чрез светодиодна технология (фиг. 15.3):

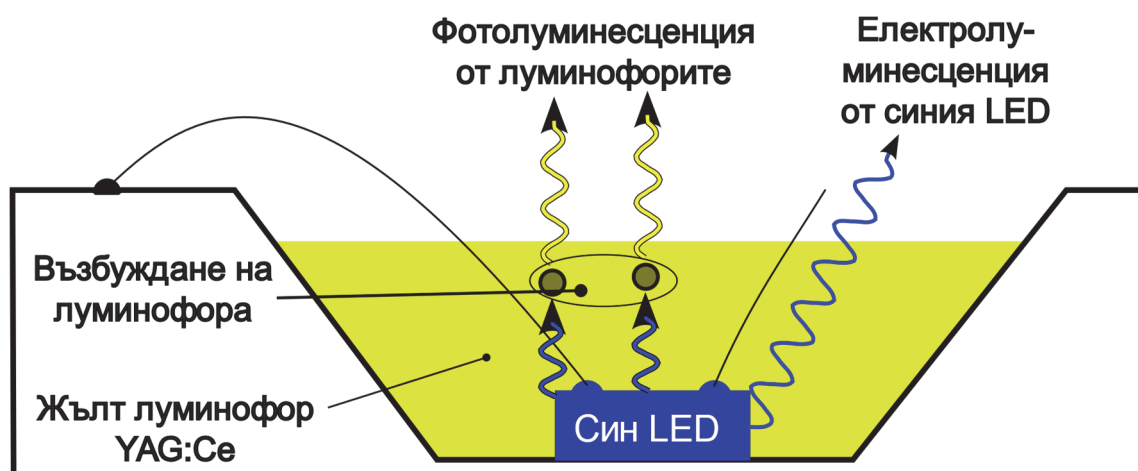
(A) RGB LED – смесване на светлината от червени, зелени и сини светодиоди;

(B) Blue LED+Yellow phosphor – син LED чип, покрит с жълт луминофор;

(C) UV LED+RGB phosphor – ултравиолетов светодиод покрит с луминофори излъчващи червен, зелен и син/жълт цвят.

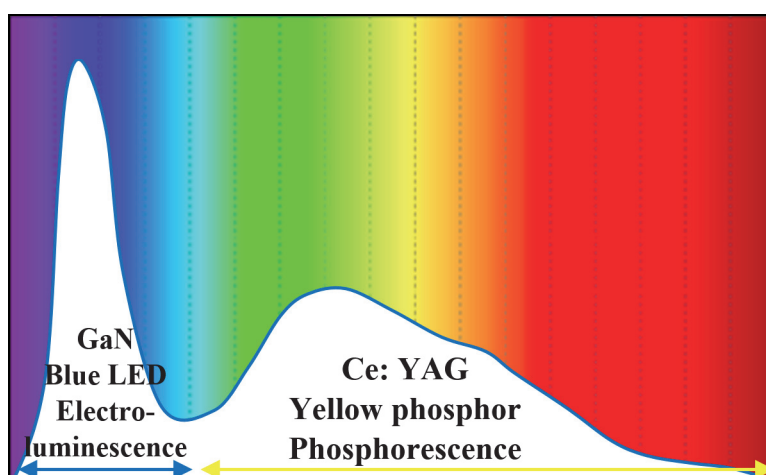
15.2.1. Светодиоди с Blue LED + Yellow phosphor технология

Технологията Blue LED + Yellow phosphor е най-разпространена, поради най-високата си и продължаваща да увеличава светлинна ефективност, постигната от източник на бяла светлина $\eta = 100 \div 230 \text{ lm/W}$ и индекс на цвето предаване $R_a = 80 \div 85$.



Фиг. 15.4. Примерна конструкция и принцип на работа на светодиод с Blue LED + Yellow phosphor технология

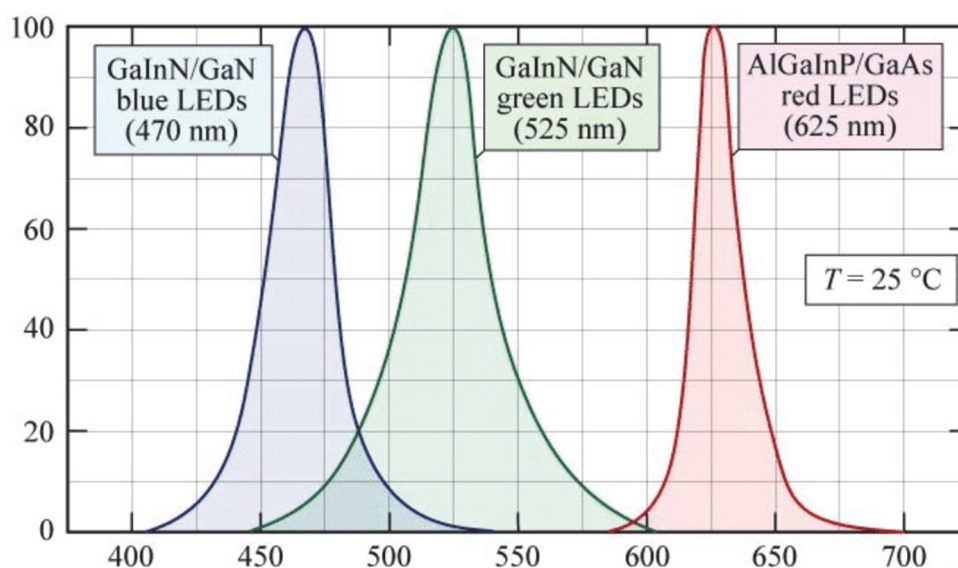
Примерна конструкция и принцип на работа на светодиод с Blue LED + Yellow phosphor технология е показана на фиг. 15.4, а на фиг. 15.5 – формирането на типичното му спектрално разпределение. Синята светлина, излъчвана директно от базираната на GaN LED електролуминесценция (с пик при около 465 nm), се комбинира с по-широколентовата светлина с изместване на Стокс, излъчвана от фотолуминесценцията в зоната 500÷700 nm на Ce³⁺:YAG (итриев алуминиев гранат – Y₃Al₅O₁₂).



Фиг. 15.5. Формиране на спектралното разпределение на светодиод с Blue LED + Yellow phosphor технология [94]

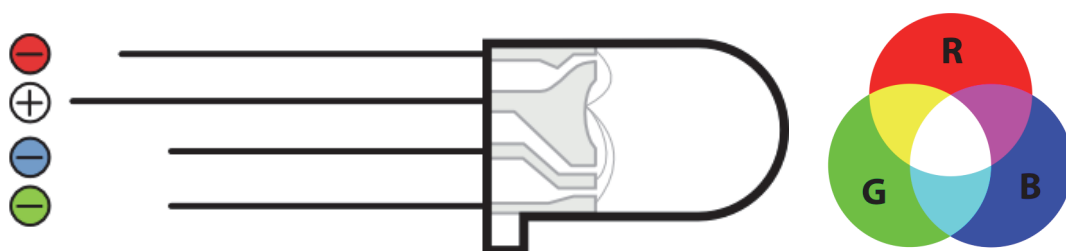
15.2.2. Светодиоди с RGB LED технология

Технологията RGB LED използва смесване на светлината от електролуминесценцията на три цветни светодиода - син, зелен и червен (фиг. 15.6), обикновено вградени в общ корпус (фиг. 15.7).



Фиг. 15.6. Типично спектрално разпределение на електролуминесцентното излъчване на червен, зелен и син светодиод [94]

Възможността за отделно електрозахранване и настройка на интензитета на отделните цветни диоди води до основното предимство на RGB светодиодите - възможността за регулиране и получаване на различен цвят на светлината. Бялата светлина, получена от сравнително тесния спектър на излъчване на светлина на червените, зелените и сините светодиоди, има сравнително по-нисък индекс на цвето предаване от $R_a = 25 \div 65$ в сравнение със светодиодите с технологията Blue LED + Yellow phosphor. При бялата светлина в RGB LED, освен мощния син светодиод, се използват по-малко ефективните зелен и червен, което води до по-ниска ефективност на RGB светодиодите при получаване на бяла светлина, отколкото на светодиодите с Blue LED+Yellow phosphor технология.



Фиг. 15.7. Светодиод с RGB технология [94]

15.2.3. Светодиоди с UV LED+RGB phosphor технология

Технологията UV LED+RGB phosphor с ултравиолетов светодиод покрит с луминофори излъчващи червен, зелен и син/жълт цвят (фиг. 15.3-С), не е широко разпространена в практиката и на пазара в момента. Бялата светлина се получава чрез покриване на UV светодиод с излъчване в близка до видимата ултравиолетова област (Near UV, или UV-A), със смес от високоефективни луминофори на базата на европий, които излъчват червено и синьо, плюс цинков сулфид, легиран с мед и алуминий ($\text{ZnS}:\text{Cu}, \text{Al}$), който излъчва зелено. Тази технология е аналогична на получаването на бяла светлина при триивичните луминесцентни лампи с луминофори възбуждани от UV излъчването на живачните пари.

Технологията UV LED+RGB phosphor е по-ниско енергийно ефективен от Blue LED+Yellow phosphor, тъй като отместването на Стокс е по-голямо, така че повече енергия се преобразува в топлина, но поради по-плавното покритие на видимия спектър, дава бяла светлина с по-добри спектрални характеристики и цвето предаване. Поради по-високата радиационна мощност на ултравиолетовите светодиоди, отколкото на сините, и двата метода предлагат сравнима яркост. Потенциална опасност на технологията е, че ултравиолетовата светлина може да „изтече“ от неправилно работещ източник на светлина и да причини увреждане на човешките очи или кожа. Основно предимство на UV LED+RGB phosphor технологията е възможността за получаване на бяла светлина с много висок индекс на цвето предаване от $R_a = 95 \div 99$.

15.2.4. OLED и QLED технологии

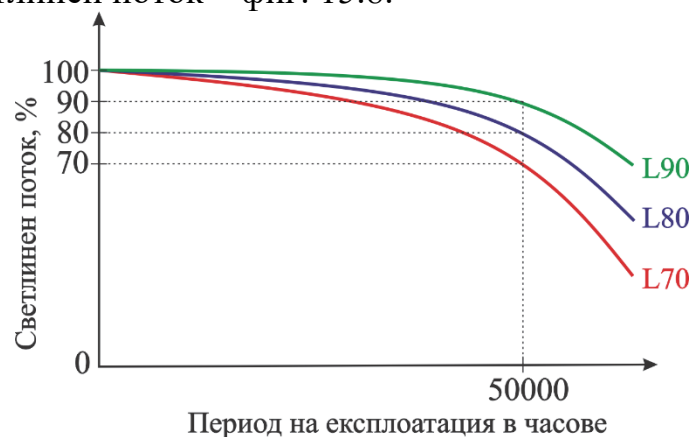
През последните години бяха разработени нови обещаващи светодиодни технологии, които в близко бъдеще могат да бъдат в основата на иновативни източници на бяла светлина: Organic LED (OLED) и Quantum-dot LED (QLED или QDLED). В OLED електролуминесцентният материал, съставляващ емисионния слой на диода, е органично съединение. Органичният материал е електропроводим поради делокализацията на p_i електрони, причинена от конюгация върху цялата или част от молекулата, и следователно материалът функционира като органичен полупроводник [46]. Органичните материали могат да бъдат малки органични молекули в кристална фаза или полимери. Потенциалните предимства на OLED включват тънки, евтини дисплеи с ниско захранващо напрежение, широк зрителен ъгъл и висок контраст и цветова гама. Полимерните светодиоди имат допълнителното предимство на гъвкави дисплеи с възможност за печат. OLED са използвани за създаване на визуални дисплеи за преносими електронни устройства като мобилни телефони, таблети и телевизори, като възможните бъдещи приложения включват и осветлението. [44,75]

Специфична част от QLED са полупроводникови нанокристали с оптични свойства, които позволяват цветът на излъчването им да бъде настроен от видимия към инфрачервения спектър.[79] Това позволява на светодиодите с квантови точки да създават почти всеки цвят на CIE диаграмата. Това осигурява повече цветови опции и по-добро цветопрераждане от белите светодиоди, тъй като спектърът на излъчване е много по-тесен, характерен за квантово ограничените състояния. Има два вида схеми за възбуждане на QD. Единият използва фотовъзбуждане с основен източник на светлина LED (обикновено се използват сини или UV светодиоди). Другото е директно електрическо възбуждане, демонстрирано за първи път през 1994 г.[67]

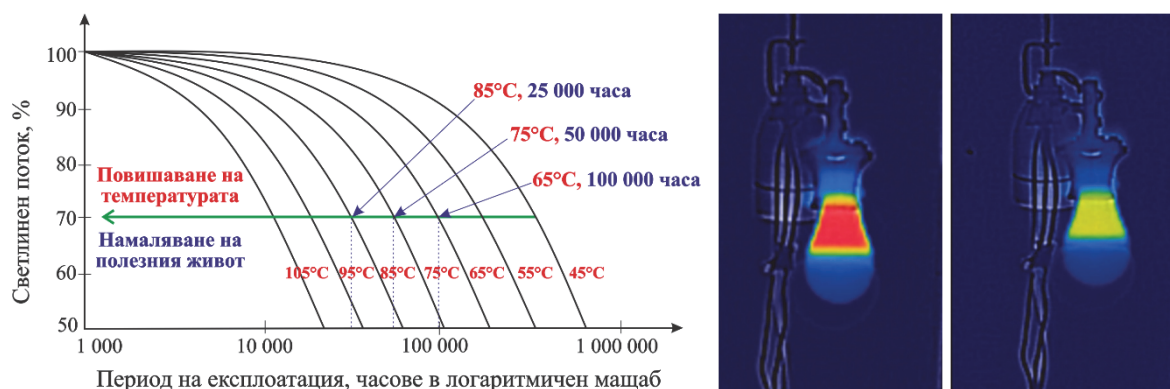
15.3. Експлоатационни характеристики на светодиодите

Едно от предимствата на светодиодите е дългият им живот, тъй като те нямат подвижни части, волфрамови жички или електроди, които да ограничават срока им на експлоатация. Техническият живот на светодиодите е около 100 000 часа, но обикновено те не се използват напълно поради намаляване на светлинния поток в края. Тенденцията на намаляване на светлинния поток на светодиода във времето е различна в зависимост от различни конструктивни и експлоатационни фактори (фиг. 15.8). Публикуван е международен стандарт IEC 62717:2014 „LED модули за общо осветление – Изисквания за производителност“ за това как трябва да се декларира животът на LED осветителите и IEC 62722-2-1:2014 „Специални изисквания за LED осветители“. IEC 62722 посочва както метода на изпитване, така и минималното необходимо време за тестване на живота на светодиодите. Минималното време за изпитване е 6000 часа, като светлинният

поток се записва на всеки 1000 часа. Тези стойности се екстраполират с помощта на метод, посочен в IES TM21. Животът на LED модула и драйвера трябва да се декларира отделно. Ако животът на драйвера е по-кратък от този на LED, може да се наложи замяна на драйвера, преди да приключи жизненият цикъл на осветителя. Това означава, че не може еднозначно да се декларира общият живот на LED осветителя. В IEC 62717 е въведена полезна метрика за „среден полезен живот“. Това е времето в часове, за което 50% от използваните LED осветители достигнат обявения светлинен поток, съпътствано от обозначение L70, L80 или L90, което показва нивото на намаление съответно на 70, 80 и 90 процента спрямо първоначалния светлинен поток – фиг. 15.8.



Фиг. 15.8. Намаляване на светлинния поток на LED при експлоатация



Фиг. 15.9. Температурна зависимост на средния полезен живот и светлинния поток на LED

Работната температура е основният параметър, от който зависи животът и ефективността на светодиодите. Според технически данни на водещи производители и лабораторни измервания, когато температурата се повиши с 10 °C, животът на светодиода намалява два пъти, а светлинният поток с 3% до 8% (фиг. 15.9). Термографските измервания на процеса на нагряване показват, че продължителността на охлаждане на отоплителната система за тестваните модели LED осветителни тела варира в рамките на 30 до 120 минути. Достигнатите зададени температури са от 35 до 88 гра-

дуса по Целзий, с процентно увеличение от 30% до 270% от първоначалната околна температура от 20 градуса по Целзий. По-ниско температурно прегряване има при моделите с алуминиеви корпуси и радиатори. Относителният светлинен поток при достигане на зададения режим за тестваните светодиоди намалява от първоначалния с 4% до 17%, като най-голямата стойност е за относително мощен светодиод без алуминиев радиатор. [93]

Електрозахранването на LED не се осъществява директно от мрежовото напрежение, а посредством специализирани електронни пусково-регулиращи апарати, наречени драйвери, базирани на различни електронни схеми. Драйверите за LED осветители най-често използват електронната схема с широчинно-импулсна модулация (PWM) или схема на мостов токоизправител с капацитивен делител (BRC). С PWM драйверите се получава стабилен източник на постоянен ток и съответно светлинен поток на светодиодите, които са гарантирани в широк диапазон на изменение на захранващото напрежение. За BRC драйверите електрическият ток и светлинният поток на светодиодите са пропорционални на захранващото напрежение, което позволява димиране на светлинния поток на светодиодите.[92] Тази функционалност е налична и с PWM драйвери чрез усложняване на електронната схема. Качеството на електронните светодиодни драйвери е от голямо значение за тяхната надеждна работа, тъй като животът на електронните компоненти, използвани в тях, особено на кондензаторите, е съизмерим и често по-малък от този на самите светодиоди. Осигуряването на стабилен нискотемпературен работен режим на драйверите и светодиодите е еднакво важно за осигуряване на дълъг експлоатационен живот на LED осветителите.

Международният стандарт IEC 62717:2014 „LED модули за общо осветление – Изисквания за производителност“ предлага шестцифрен фотометричен код за обозначаване на LED, който е свързан с най-важните техни експлоатационни параметри, които се счита, че трябва да бъдат деклариран от производителите. Първата група от 3 цифри е аналогична на известното прието цветово кодиране при луминесцентните лампи, докато втората група от 3 цифри съдържа обозначения за специфични експлоатационните показатели за оценка на стабилността на цвета и светлинния поток на светодиода.



Фиг. 15.10. Шестцифрен фотометричен код за обозначаване на параметрите на LED

Пример за шестцифрен код на светодиода - Code = 830/358

- „8“ - индекс на цветопрераждане в началото на срока на експлоатация $R_a \geq 80$;
- „30“ - корелирана цветна температура в началото на срока на експлоатация $T_{ce}=3000K$;
- „3“ - разсейване на цветовете координати в началото на срока на експлоатация в елипса 3-та степен от системата на Макадам;
- „5“ - експлоатационно разсейване на цветовете координати в елипса 5-та степен от системата на Макадам;
- „8“ - намаляване на светлинния поток за обозначения срок на експлоатация на LED с не повече от 80% (L80).

15.4. Сравнение на основните параметри на светлинните източници

В табл. 15.1 са обобщени основните технически и експлоатационни параметри на най-често използваните в практиката източници на светлина. Някои от параметрите са показани като диапазони на стойности, тъй като те варират значително за отделните конструкции на даден светлинен източник.

Табл. 15.1. Сравнение на основните технически и експлоатационни параметри на светлинните източници

Параметър	Светлинен източник							
	Нажежаема лампа	Нажежаема халогенна лампа	НЛВН	НЛНН	МХЛ	ЛЛ	КЛЛ	LED
Живот, часове	1000	3000	16000÷24000	10000÷18000	10000÷16000	10000÷15000	6000÷12000	25000*÷100000
Светлоотдаване, lm/W	9÷13	15÷25	70÷140	140÷170	70÷110	50÷90	40÷70	80÷230**
Индекс на цветопрераждане R_a	98	100	25	0	75÷95	80÷95	80÷90	70÷85
Корелирана цветна температура T_c , K	2 700	3 000	2100	1700	2700÷6500	2700÷6500***	2700÷6500***	2700÷6500***

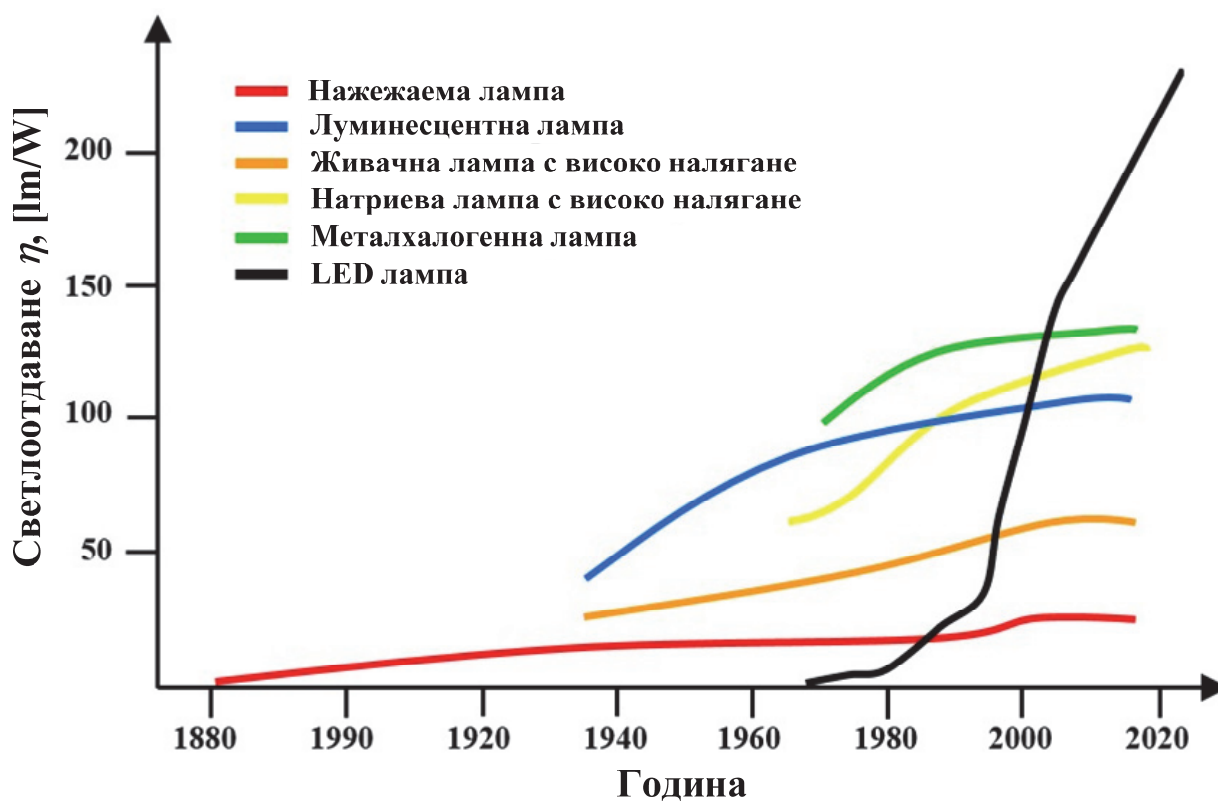
* Силно зависи от температурния режим (охлаждане) на LED модула

** Светлоотдаване на LED продължава да се увеличава с приблизително 10 lm/W на година през последните 20 години

*** Зависи от химическия състав на използвания луминофор

Очаква се след оптимизиране на все още развиващата се най-модерна LED технология да се достигне теоретичното максимално светлоотдаване от около 270 lm/W на светлинен източник с много добро цветопрдаване ($R_a > 80$). Би могло да бъде достигнато и по-високо светлоотдаване при намаляване на цветопрдаването под ($R_a < 80$) за приложения, които не изискват високо цветопрдаване, например улично и охранно осветление и др. Това се постига с използване на луминофори излъчващи по-голяма част от светлинния поток в жълтозелената част от спектъра, около максимума на спектралната чувствителност на човешкото око $\lambda = 555 \text{ nm}$, което се използва и в настоящия момент от някои производители на улични осветители за повишаване на светлоотдаването до над 180 lm/W при $R_a \approx 70$.

Графично представяне на нарастващото чрез технически подобрения светлоотдаване на светлинните източници от тяхното изобретяване през годините досега е показано на фиг. 15.11.



Фиг. 15.11. Нарастване на светлоотдаването на различните технологии светлинни източници във времето.

Сравнението на скоростта на нарастване на светлоотдаването на различните видове лампи и тази на светодиодите показва, че светодиодната е най-бързо усъвършенстваната в годините технология, която вече е по-енергийно ефективна от всички изобретявани до настоящия момент.

16. ПУСКОВО-РЕГУЛИРАЩА АПАРАТУРА. УПРАВЛЕНИЕ НА ОСВЕТЛЕНИЕТО

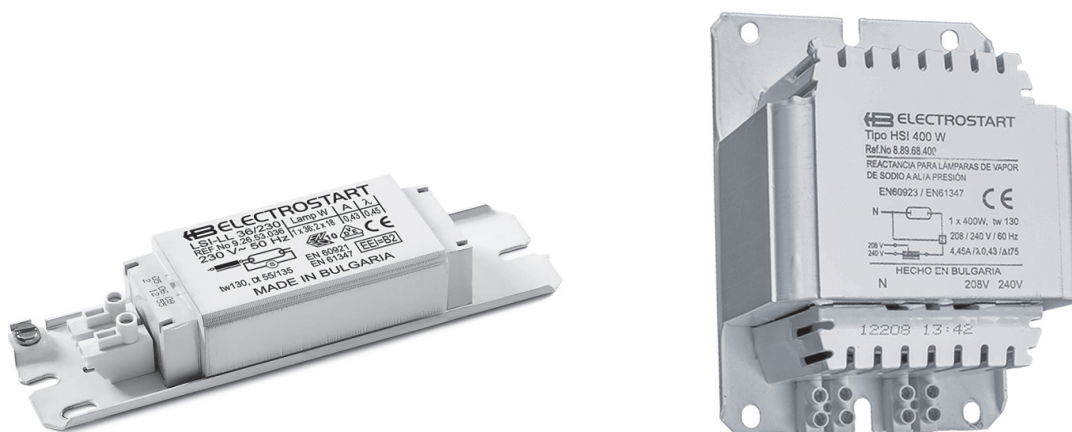
16.1. Конвенционална пусково-регулираща апаратура

За разлика от нажежаемите и нажежаемите халогенни лампи, които се свързват към електрическата мрежа директно или чрез автотрансформатор, разрядните лампи с високо и ниско налягане и светодиодните лампи се свързват към мрежата посредством пусково-регулираща апаратура. Видът и елементите на ПРА се определят от вида и мощността на лампата.

Основните елементи на конвенционалната ПРА за разрядните лампи са индуктивен баласт, кондензатори, стартер и запално устройство, които са в различна конфигурация в зависимост от вида на лампата.

а) Индуктивен баласт - дросел

Индуктивният баласт (дросел) намира най-широко разпространение във веригите за променлив ток на разрядните лампи. Предназначението му е за ограничаване на тока през лампата в областта на дъговия разряд на ВАХ (фиг. 8.6) и за стабилизиране на работния режим. Основните елементи на дросела са магнитопровод (феромагнитен материал от листов електротехническа стомана) и медна намотка. Външният вид на дросел за една ЛЛ с мощност 36 W или две ЛЛ с мощност 2×18 W е показан на фиг. 16.1а, а на фиг. 16.1б – дросел за НЛВН с мощност 400 W.



а) Дросел за ЛЛ с мощност 36 W б) Дросел за НЛВН с мощност 400 W
Фиг. 16.1. Индуктивни баласты за разрядни лампи

Върху дроселите се обозначават тип и номинална мощност на лампата, номинални напрежение и честота на мрежата, номинален ток на лампата, максималната допустима температура, естествен (без компенсиращ кондензатор) фактор на мощност на схемата.

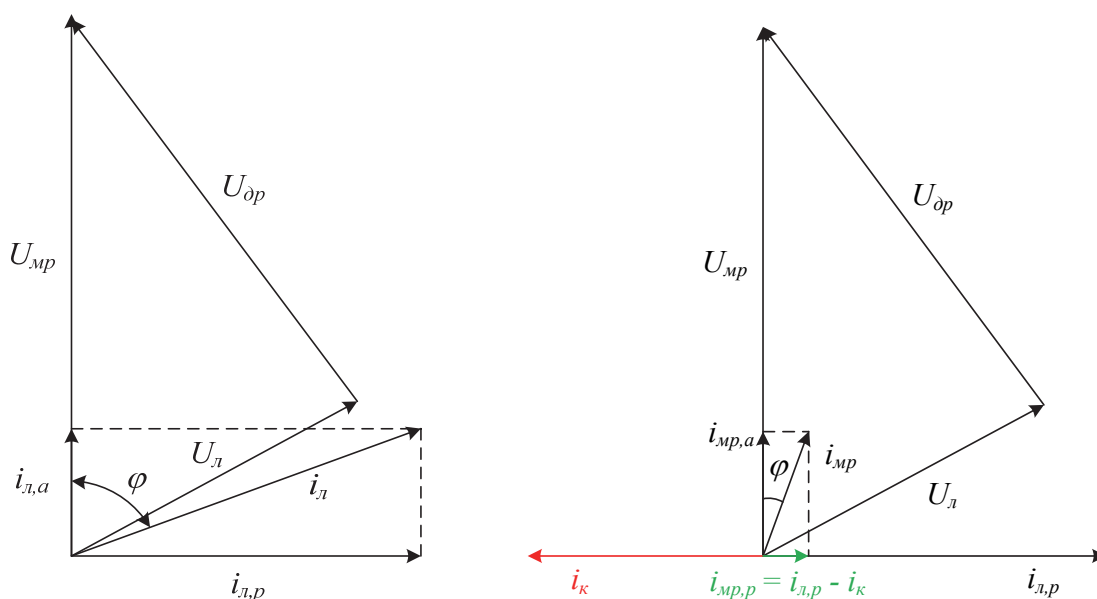
Електрическите схеми при работа на разрядна лампа с индуктивен баласт са показани и разгледани във предходните въпроси за съответния

вид лампа. Токът на лампата i_l , при пренебрегване на активното съпротивление на дросела, с достатъчна точност се определя с израза:

$$i_l = \frac{U_{др}}{\omega L_{др}} = \frac{U_{др}}{X_L}, \quad (16.1)$$

където: $L_{др}$ – индуктивност на дросела, [H]; $U_{др}$ – напрежение на дросела, [V]; X_L – индуктивно съпротивление на дросела, [Ω]; $\omega = 2\pi f$ – кръгова честота, [s^{-1}].

На фиг. 16.2а е показана векторна диаграма при работа на разрядни лампи с индуктивен баласт.



а) Индуктивен баласт б) Индуктивен баласт и компенсиращ кондензатор

Фиг. 16.2. Векторна диаграма при работа на разрядни лампи

Токът на лампата i_l , включена последователно с дросела в променливотоковата мрежа, изостава от мрежовото напрежение $U_{мр}$ на ъгъл φ . Стойността на ъгъла φ се определя от индуктивността на баласта $L_{др}$ и съотношението между напрежението на лампата U_l и $U_{мр}$. При включване на ЛЛ с мощност 36 W към мрежово напрежение 230 V, ъгълът е $\varphi = 60^\circ$. Във вериги с индуктивен баласт и честота на захранващата мрежа $f = 50$ Hz напрежението на лампата U_l в работен режим е дефазирано спрямо тока на лампата i_l на ъгъл $\varphi = (8 \div 12)^\circ$, тъй като има изкривяване на формата на кривите на тока и напрежението на лампата и наличие в i_l на съставлящи с по-висока честота (висши хармонични), в сравнение с честота на захранващата мрежа f [27,38]. При идеализиран вариант на дросел (без активни загуби), векторът на напрежението на дросела $U_{др}$ е перпендикулярен на вектора на тока на лампата i_l .

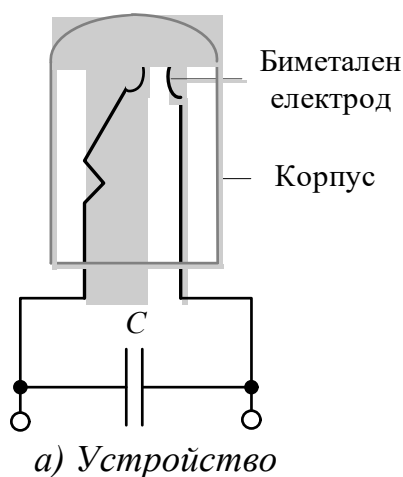
Факторът на мощността на електрическата схема може да се повиши от $\cos \varphi = (0,40 \div 0,60)$ до $\cos \varphi \geq 0,90$, ако се включи компенсиращ кондензатор във веригата на разрядната лампа. Капацитетът на кондензатора C_k се избира така, че токът i_k през кондензатора да компенсира реактивната съставляваща на тока $i_{л,р}$ до $\cos \varphi = 0,90 \div 0,95$ на цялата схема (фиг. 16.2б).

Средната продължителност на работа на дроселите е между 10 и 20 години и се определя от режима на работа на лампата.

Дроселите имат сравнително големи собствени загуби на активна мощност – в зависимост от вида и мощността на лампата и схемата на включване, те са между $(5 \div 30) \%$. Това е съществен недостатък при съвременните изисквания за енергийна ефективност. Затова дроселите се заместват от електронната пусково-регулираща апаратура (ЕПРА).

б) Стартер

Стартерите се използват в схемите на включване на луминесцентните лампи със стартерно запалване. Те трябва да удовлетворяват изискванията, посочени в стандарта за стартери с тлеещ разряд за луминесцентни лампи [13]. Устройството на стартер е показано на фиг. 16.3а.



б) Външен вид

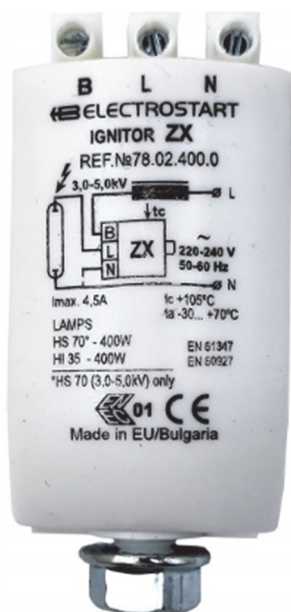
Фиг. 16.3. Стартери за луминесцентни лампи

Стартерът за луминесцентни лампи се състои от стъклен корпус, наричан стъклена ампула, който е напълнен с инертен газ под налягане, подобрано така, че приложеното към електродите на стартера пусково напрежение предизвиква в корпуса тлеещ разряд. При този разряд биметалните електроди на стартера се нагряват и огъват, докато се опрат. С допирането на електродите разрядът в стартера се прекъсва и през електродите на лампата токът нараства и ги нагрява допълнително [22].

Съпротивлението на биметалните електроди се подбира така, че токът през тях да не ги нагрява съществено. При липса на тлеещ разряд биметалните електроди се охлаждат, изправят се и разкъсват веригата. Луминесцентната лампа се запалва, при което напрежението и токът достигат

работните си стойности, а потенциалът върху стартера се оказва недостатъчен за предизвикване на тлеещ разряд и той остава изключен. Амплитудата на импулса на напрежението при стартерно запалване достига обикновено ($1\,000 \div 1\,200$) V, а ако се включи кондензатор паралелно на стартера, както е показано на фиг. 16.3а, амплитудата може да се увеличи още, като стойността зависи от фазата на напрежението на мрежата и от капацитета на кондензатора. Освен това, при наличие на кондензатор се увеличава продължителността на импулса на напрежението до 1 500 ms. Кондензаторът, включен паралелно на стартера, изпълнява и функциите на филтър срещу радиосмущения.

в) Запално устройство (ЗУ)



Фиг. 16.4. Запално устройство за НЛВН и МХЛ

В схемите на включване на натриеви лампи с високо налягане и металхалогенни лампи се използват запални устройства [34]. Запалното устройство генерира комбиниран импулс на напрежението, състоящ се от:

- високоволтов импулс ($2 \div 5$) kV, необходим за пробив в междуелектродното пространство на разрядната лампа;
- нисковолтов импулс ($600 \div 800$)V, способстващ за преминаването на тлеещия разряд в дъгов разряд.

На фиг. 16.4 е показан външен вид на запално устройство, което е предназначено за НЛВН с мощности от 70 W до 400 W и за МХЛ с мощности от 35 W до 400 W [109]. Запалните устройства трябва да съответстват на изискванията, посочени в стандартите за спомагателни и пускови устройства за лампи [14,15]. Производителите на запални устройства трябва да посочват за кои видове лампи са предназначени и за какви мощности, също така и обхвата на високоволтовия импулс, максималния продължителен (работен) ток на схемата, захранващото напрежение и честота, максималната допустима температура, обхват на околната температура и схемата на свързване с разрядната лампа и дросел.

16.2. Електронна пусково-регулираща апаратура за разрядни лампи и драйвери за светодиоди

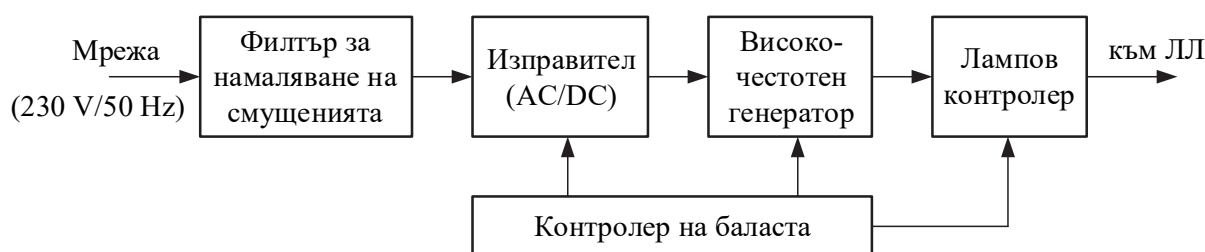
а) Електронна пусково-регулираща апаратура за разрядни лампи

С ЕПРА се постигат значително по-малки загуби на мощност, удължаване на живота на лампите, по-малки пулсации на светлинния поток и възможности за гъвкаво управление на лампите. Затова ЕПРА заменя конвенционалната ПРА в съвременните вериги на разрядните лампи.

ЕПРА осигурява работата на луминесцентните лампи с повишена честота ($30 \div 90$) kHz. Предимствата на ЛЛ при работа с ЕПРА с повишена честота в сравнение с работата при честота 50 Hz се изразяват в:

- консумираната мощност на схемата е по-малка от номиналната мощност на лампата, тъй като при повишена честота се намалява мощността на лампата;
- увеличаване на светлоотдаването на лампите, тъй като с увеличаване на честотата се намаляват катодните загуби;
- увеличаване на продължителността на работа на лампите, тъй като електродите са предварително подгreti, а луминофорът и катодите са по-малко натоварени (триивичните ЛЛ с дросел работят 8 000 h, докато с ЕПРА работят 12 000 h);
- заместване на стартера и компенсиращия кондензатор с ЕПРА (при схеми с корекция на фактора на мощността);
- незабележими за човешкото око пулсации на светлинния поток и липса на стробоскопичен ефект при работна честота $> 1\,000$ Hz;
- бързо, безшумно и без премигвания включване на лампите;
- повишаване на сигурността, тъй като в случай на повреда в ЕПРА, същата се изключва автоматично от мрежата и има възможност да премине в автономен режим на работа с акумулатор.

На фиг. 16.5 е показана блоковата схема с основните компоненти на ЕПРА, използвана за ЛЛ [27].



Фиг. 16.5. Блокова схема на ЕПРА

След филтъра против смущения, мрежовото напрежение се изправя в AC/DC преобразувателя [5,26]. Той съдържа буферен кондензатор, който се зарежда с постоянно (DC) напрежение. Във високочестотния генератор постоянното напрежение се преобразува във високочестотно и се подава към ламповия контролер. Всички действия се управляват и координират от баластния контролер.

Изправителят се състои от пълен диоден мост (съставен от четири изправителни диода). Буферният кондензатор определя големината на пусковия ток, формата на тока в лампата и мрежата и трябва да минимизира колебанията на тока и респ. пулсациите на светлинния поток. По-големият капацитет на кондензатора намалява пулсациите, но формата на тока е по-изкривена, поради по-големите хармонични изкривявания.

Високочестотният генератор, управляван от баластния контролер, е съставен от полупроводникови ключове, които се превключват с честота от 20 kHz (с което се избягват чуваемите аудио честоти) до 100 kHz. С него се осигурява високочестотно правоъгълно напрежение на електродите на лампата.

Чрез контролера се управляват процесите на ЕПРА и лампата: подгряване на електродите, регулиране на мощността, защитно изключване.

б) Драйвери за светодиоди

Електрозахранването на светодиодите се извършва със специализирани електронни преобразуватели, наричани с навлязлата в практиката в България чуждица – драйвери, които преобразуват променливото напрежение в постоянно с подходящи за нормалната им работа стойности. Светодиодите работят със стабилизирани по ток постояннотокови източници при ток, обикновено на стойности 350 mA, 700 mA, 1 A и по-големи [27]. При свързване на по-голям брой светодиоди последователно, драйверът увеличава постоянното напрежение, така че да се постига номиналният ток на светодиодите. В практиката съществуват редица фирмени технически решения за реализация на електронните схеми на драйверите, които не са предмет на учебната дисциплина „Осветителна и инсталационна техника“.

16.3. Управление на осветлението

В Наредба №1 от 27 май 2010 г. за проектиране, изграждане и поддържане на електрически уредби за ниско напрежение в сгради, т. 12.1.2. е записано, че осветлението може да представлява голям дял в консумацията на енергия в една електрическа уредба, зависейки от вида лампи и осветителни тела за тяхното приложение. Контролът на осветлението е един от най-лесните начини за подобряване на енергийната ефективност. Затова контролът на осветлението трябва да бъде обект на особено внимание. Видът на светлинните източници, конструкцията на баластните устройства, комутационната апаратура и управляващата апаратура трябва да бъдат отчетени при прилагането на контрол на осветлението.

Решения за контрола на осветлението могат да подобрят енергийната ефективност с повече от 50 %. Прилаганите системи трябва да са гъвкави и проектирани за комфорт на потребителите. Решенията могат да варират от много малки и локални, като такива с таймер и сензори за движение/обитаване, до сложни персонализирани и централизирани решения, които са част от системите на цялата сградна автоматизация.

За да работи осветлението само там, където и когато е нужно, перманентен контрол на осветлението може да бъде реализиран, използвайки например:

- а) детектори на движение;
- б) устройства за контрол за постоянна яркост;

- в) превключватели с таймер;
- г) превключватели с часовник;
- д) превключватели, чувствителни към светлина.

Системите за управление осигуряват възможност за автоматично регулиране (включване, изключване или димиране) на осветлението чрез някои от следните начини:

- по време – хронологично или в зависимост от изгрева и залеза и се реализира с програмируеми релета и/или часовници;
- по присъствие – чрез сензор за присъствие;
- в зависимост от нивото на дневната светлина – чрез фотоклетки;
- чрез програмируеми контролери.

Съвременното управление на осветлението се осъществява чрез автоматично включване и изключване, изменение (димиране) на светлинния поток, плавно изменение на корелираната цветна температура на LED в голям брой помещения в една сграда.

Съществуват редица фирмени решения за реализация на централизирано цифрово управление на осветлението, като сред международно стандартизираните най-разпространени са:

- KNX система: стандарт за автоматизация на сгради, който включва и управление на осветлението. Системата позволява контрол на осветлението според различни параметри като време, присъствие на хора или външна светлина;

- DALI (Digital Addressable Lighting Interface): протокол за управление на осветлението, който позволява индивидуално адресиране, контрол и управление на отделни осветителни тела или групи от тях. Използва се в комерсиални сгради, офиси и други големи обекти, където се изисква прецизно управление на осветлението и оптимизиране на енергийната ефективност. DALI системите могат да регулират яркостта, да включват и изключват осветителните тела, както и да създават различни светлинни сцени.

В много случаи тези стандартизирани протоколи са интегрирани с BMS (Building Management Systems): интегрирани платформи за управление на различни системи в сгради, включително осветление, отопление, вентилация и сигурност. Те позволяват централизирано управление и мониторинг на всички системи в сградата, като осветлението може да бъде оптимизирано според графици, присъствие или външни условия.

В практиката се използват и редица безжични системи за цифрово управление на осветлението: Zigbee, Bluetooth Mesh, Bluetooth Low Energy (BLE), Wi-Fi, Z-Wave, IoT (Internet of Things), MIDI, DMX и други.

Технологията Li-Fi (Light Fidelity) за безжична комуникация използва светлинни вълни за предаване на данни. Тя представлява алтернатива на Wi-Fi, която вместо радиовълни използва видима светлина от LED за пренос на информация, която се кодира с премигване на светлината, което е незабележимо за човешкото око, но се декодира от специални приемници.

17. ОСВЕТИТЕЛИ – УСТРОЙСТВО И ВИДОВЕ

17.1. Общи сведения

Светлинните източници обикновено излъчват във всички посоки на пространството. За по-рационално използване на техния светлинен поток е целесъобразно той да бъде преразпределен и насочен към осветявания обект. Съвременните осветителни уредби, чрез които се създава зададено ниво на осветеност и се осигурява благоприятно разпределение на яркостите в областта на зрителното поле, в повечето случаи са немислими без използване на осветители.

Осветителят е устройство, което разпределя, филтрира или преобразува светлината и съдържа светлинен източник и необходимите носещи и закрепващи компоненти, оптична система за пренасочване на светлинния поток, елементи за електрозахранване и защита на светлинния източник. При необходимост, осветителят съдържа и допълнителни вериги, комбинирани с елементи за свързване към захранващ източник с електрическа енергия [16,19,27,45,73]. Обикновено като светлинен източник в осветителя се използва електрически източник на светлина – лампа.

Светлинният източник в осветителя може да бъде сменяем или несменяем. Осветителите с нажежаеми и разрядни лампи са конструирани така, че техните лампи да могат да бъдат сменяни по време на експлоатация, тъй като животът на тези лампи е по-малък от този на останалите компоненти на осветителя. Повечето съвременни светодиодни осветители са не обслужваеми и LED източниците, които имат живот, съизмерим с този на останалите елементи на осветителя, са напълно интегрирани и не могат да се сменят в осветителя.

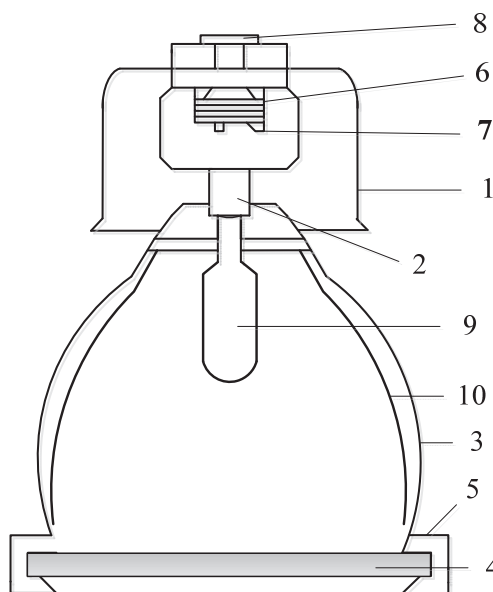
Основните характеристики на осветителите, определящи техните свойства, могат да се обособят в две групи – функционални и технико-икономически [22]. Функционалните включват светлотехническите характеристики, характеристиките на безопасност, защитеност от околната среда и надеждност, монтаж-експлоатационните характеристики, размерите и естетическите характеристики. Технико-икономическите включват коефициент на полезно действие (к.п.д.), експлоатационен срок и др.

За осветители, които се използват в жилища, хотели, ресторанти, зали и фойета за културни и обществени събития (фиг. 17.4д) и др., най-голямо внимание се отделя на тяхното естетично оформление. За осветители, които се използват в промишлени предприятия (фиг. 17.4в), обществени сгради (фиг. 17.4г), улично осветление (фиг. 17.4б), спортни обекти и др., най-голямо внимание се отделя на техните светлотехнически и технико-икономически характеристики.

17.2. Устройство на осветителите

Основните компоненти на един осветител са светлинен източник, пусково-регулираща апаратура, корпус, оптична система.

На фиг. 17.1 е показано примерно устройство на промишлен осветител, който се състои от следните елементи: 1-корпус на пусково-регулираща апаратура; 2-фасунга; 3-корпус; 4-предпазно стъкло или разсейвател; 5-силиконово уплътнение (гума); 6-дросел за разрядна лампа; 7-занулителна клемма; 8-болт или гайка за закрепване (окачване на таван); 9-светлинен източник (лампа).



Фиг. 17.1. Устройство на осветител

Корпусът определя обема на осветителя и съдържа ключовите компоненти. В зависимост от вида на корпусното тяло се определя предназначението и начина на монтаж на осветителя: за вътрешни или външни приложения; за повърхностен или вграден монтаж; окачен или монтиран на релса, стена, конзола или стълб; отворен или затворен; за нормална или силно агресивна околна среда (взривоопасна, корозия, прах и др.).

Оптичната система определя желаното преразпределение на светлинния поток на светлинния източник в пространството и намаляване на яркостта на лампата с оглед ограничаване на заслепяващото действие. Оптичната система може да се състои от отражател (рефлектор), разсейвател, леща или масив от лещи, комбинация от отражател и разсейвател.

Филтърът (ако го има) се използва за изменение на спектралните характеристики на светлината. Филтърът може да бъде поставен в някой от елементите на оптичната система на осветителя, например в разсейвателя.

Пусково-регулиращата апаратура се използва за свързване на лампата с електрическата инсталация, а в редица случаи осигурява необходимите условия за запалване и стабилизиране на режима на работа на разрядната

лампата или преобразува променливите напрежение и ток в постоянни с подходящи форма и стойности за нормалната работа на светодиодите.

Механичната конструкция обединява и свързва в едно цяло лампата с останалите съставни елементи на осветителя.

17.3. Видове осветители

В зависимост от разпределението на светлинния поток в пространството осветителите се подразделят на четири вида: *прожектори, прожекторни осветители, осветители за близко действие и сигнално-маркировъчни осветители* [19].

а) Прожектори

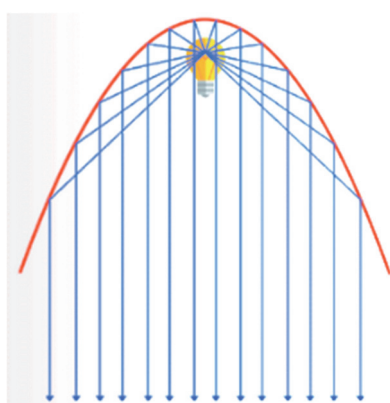
Посредством подходяща оптична система светлинният поток на прожекторите е концентриран в малък пространствен ъгъл, в резултат на което максималният интензитет на светлината може да има много големи стойности – $I_{max} \geq 8 \cdot 10^6$ cd.

На фиг. 17.2а е показано схематично устройството на прожектор с параболичен отражател. Във фокуса на огледалния параболичен отражател е поставена лампа с яркост L . Отразените от рефлектора светлинни лъчи са в успореден сноп и обуславят максималния интензитет на светлината по оптичната ос на прожектора:

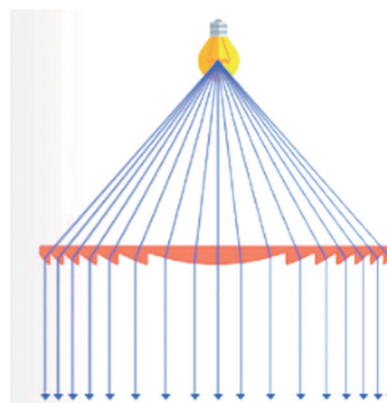
$$I_{max} = \rho LA, \quad (17.1)$$

където: ρ – коефициент на отражение на отражателя на прожектора; A – проекция на светещата повърхност на прожектора в равнина, перпендикулярна на неговата оптична ос.

Успореден сноп лъчи на светлинния поток може да се получи и с помощта на специален разсейвател – с френелова леща (фиг. 17.2б).



а) с параболичен отражател



б) с френелова леща

Фиг. 17.2. Схематично устройство на прожектор

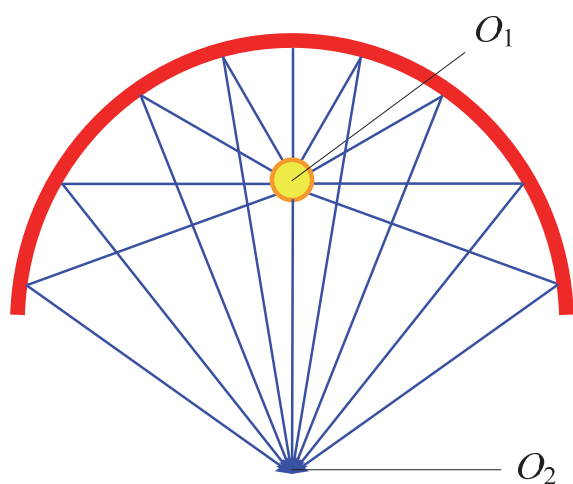
Светлоразпределителната крива на прожекторите често се представя в правоъгълна координатна система, тъй като изглежда по-разбираемо при концентрирането в малък пространствен ъгъл.

Интензитета на светлината на прожекторите е максимален по оптичната ос на прожектора $I_{\max}$ ($\gamma = 0^\circ$). Разсейването на светлинния поток на прожектора и широчината на неговия светлинен сноп е възприето да се определят със стойността на ъгъла γ , за който интензитетът намалява 10 пъти спрямо $I_{\max}$, или $I_\gamma = I_{\max} / 10$. Той се нарича ъгъл на разсейване и в зависимост от неговата стойност прожекторите се подразделят на:

- прожектори за далечно действие – $\gamma \approx 1^\circ$; те намират приложение за кратковременно осветяване на отдалечени обекти с цел откриването им;
- прожектори за близко действие (фиг. 17.4а) – $\gamma = (10 \div 100)^\circ$; те се използват за осветяване на различни обекти: открити работни площадки и високи цехове в промишлени предприятия, пристанища, комуникационни възли, открити мини, спортни терени, театрални сцени, летища, кино- и телевизионни студия и др. [19].

Прожекторите се използват и за фарове, монтирани на транспортните средства, морски фарове, за сигнална маркировка на летища, за предаване на информация чрез светлинни сигнали и др.

б) Прожекционни осветители



Фиг. 17.3. Огледален отражател с елипсовидна форма

Прожекционните осветители концентрират светлинния поток в точка от оптичната ос или в много малък пространствен ъгъл. Това се постига с помощта на огледален отражател с елипсовидна форма (фиг. 17.3). Ако светлинният източник е разположен във фокуса на елипсовидния рефлектор, отразените от него лъчи се концентрират във втория фокус O_2 или се получава увеличено изображение на светлинния източник в точка O_2 .

Прожекционните осветители намират приложение в кинопрожекционните апарати, за осветление на хирургични кабинети, в оптически пещи, в измервателни уреди и др.

в) Осветители за близко действие

Осветителите за близко действие (фиг. 17.4 б, в, г, д) преразпределят светлинния поток от светлинния източник в сравнително голям пространствен ъгъл (до 4π). Тези осветители са предназначени за осветяване на

близко разположени обекти (при разстояние от осветителя, не повече от 30 m). Осветителите за близко действие са най-разпространеният вид осветители във вътрешни и външни осветителни уредби. Техните характеристики се разглеждат подробно в следващия въпрос.



а) Прожектор



б) Уличен осветител



в) Промислен осветител



г) Осветител за офис



д) Осветители в Народно събрание



е) Сигнален осветител

Фиг. 17.4. Осветители с различно предназначение

г) Сигнално-маркировъчни осветители

Оптична част на тези осветители обикновено се състои само от стъклен или матов разсейвател. Този вид осветители се използват като светещи наблюдавани обекти: светещи пътни знаци, светещи маркировъчни устройства, светлинни реклами, светещи линии (контури), сигнални устройства (фиг. 17.4 е) и др.

18. СВЕЛТОТЕХНИЧЕСКИ ХАРАКТЕРИСТИКИ И СВЕЛТОТЕХНИЧЕСКА КЛАСИФИКАЦИЯ НА ОСВЕТИТЕЛИТЕ. СТЕПЕН И КЛАС НА ЗАЩИТА

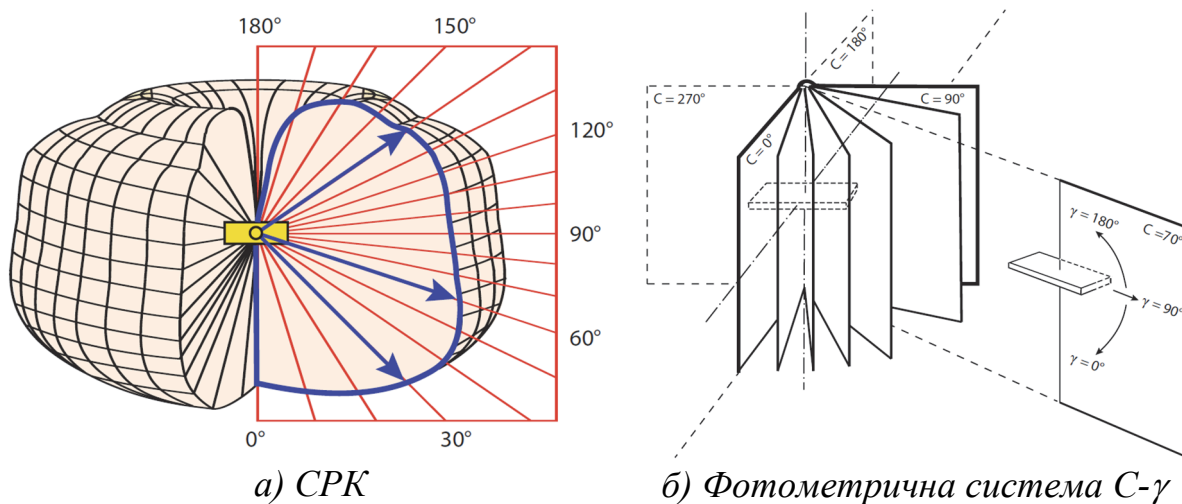
18.1. Светлотехнически характеристики и светлотехническа класификация на осветителите

Светлотехническите характеристики на осветителите се оценяват в зависимост от разпределението на светлинния поток в пространството, разпределение на интензитета на светлината (светлоразпределителна крива), коефициента на полезно действие и коефициента на използване на светлинния поток, разпределението на яркостта на светещата част на осветителя и защитен ъгъл. [27,45,73].

Осветителите могат да бъдат класифицирани по два основни признака – форма на светлоразпределителната крива и разпределение на светлинния поток в пространството.

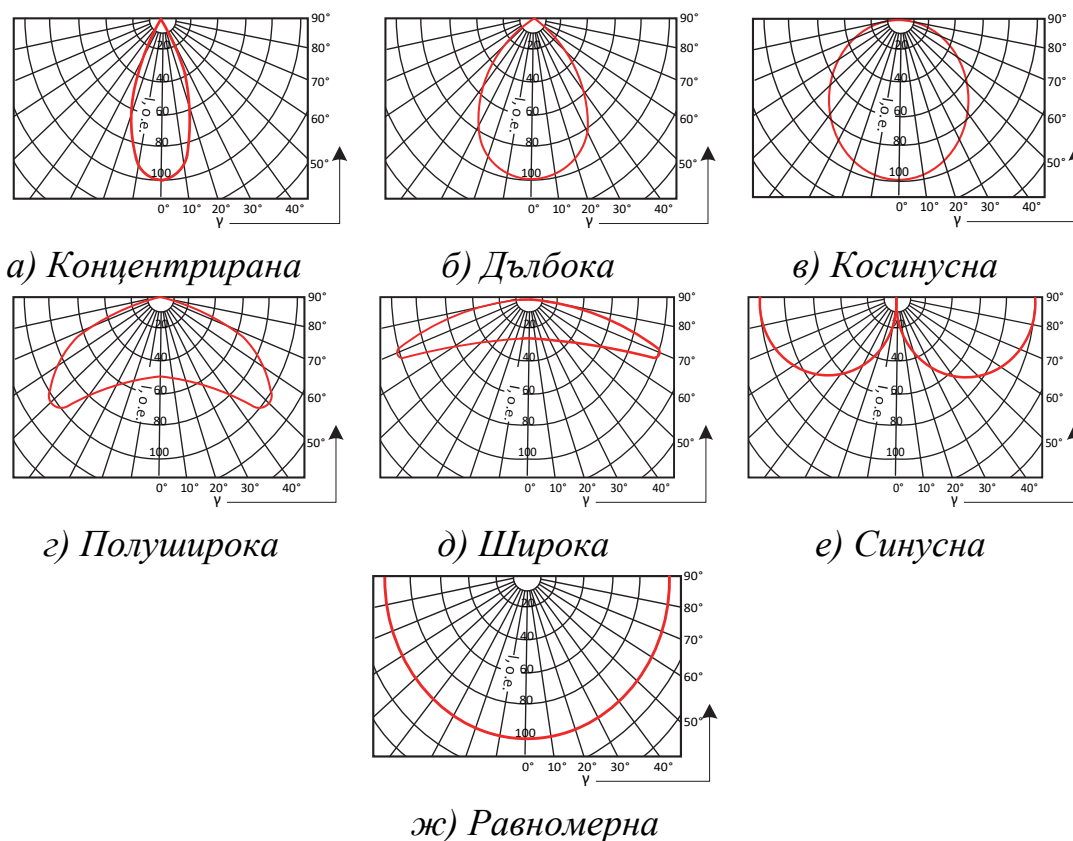
а) Светлоразпределителни криви

Светлоразпределителните криви (СРК) представят графично (фиг. 18.1а) или таблично интензитетите на светлината за различните пространствени посоки като вектори в полярна координатна система. Графичните и табличните данни на СРК се представят за условен светлинен поток на осветителя 1 000 lm. Най-разпространената фотометрична координатна система за представяне на СРК на осветители е $C-\gamma$ (фиг. 18.1б)



Фиг. 18.1. СРК и фотометрична система за нейното представяне

Светлоразпределителните криви на осветителите могат да се класифицират на седем типа, в зависимост от тяхната форма [19,27]: концентрирана (К) – фиг. 18.2а; дълбока (Д) – фиг. 18.2б; косинусна (Кс) – фиг. 18.2в; полуширока (П) – фиг. 18.2г; широка (Ш) – фиг. 18.2д; синусна (С) – фиг. 18.2е; равномерна (Р) – фиг. 18.2ж.



Фиг. 18.2. Типове СРК на осветители

При класифициране на СРК на осветителя се използва коефициентът на формата на светлоразпределението k_ϕ . Той се определя с отношението:

$$k_\phi = \frac{I_{max}}{I_{cp}}, \quad (18.1)$$

където: I_{max} – максимален интензитет на светлината на СРК на осветителя, в [cd]; $I_{cp} = \frac{1}{9} \sum_{\gamma_1=5^\circ}^{\gamma_2=85^\circ} I_\gamma$ или $I_{cp} = \frac{1}{9} \sum_{\gamma_1=95^\circ}^{\gamma_2=175^\circ} I_\gamma$ – среден интензитет на светлината, в [cd], когато интензитетът на светлината I_γ се отчита от СРК на осветителя за ъгъл $\gamma = 5^\circ, 15^\circ, 25^\circ, \dots, 85^\circ$ или $95^\circ, 105^\circ, \dots, 175^\circ$ [19,22].

За количествена оценка на концентрацията на светлинния поток в дадена (желана) посока се използва коефициент на усилване k_y :

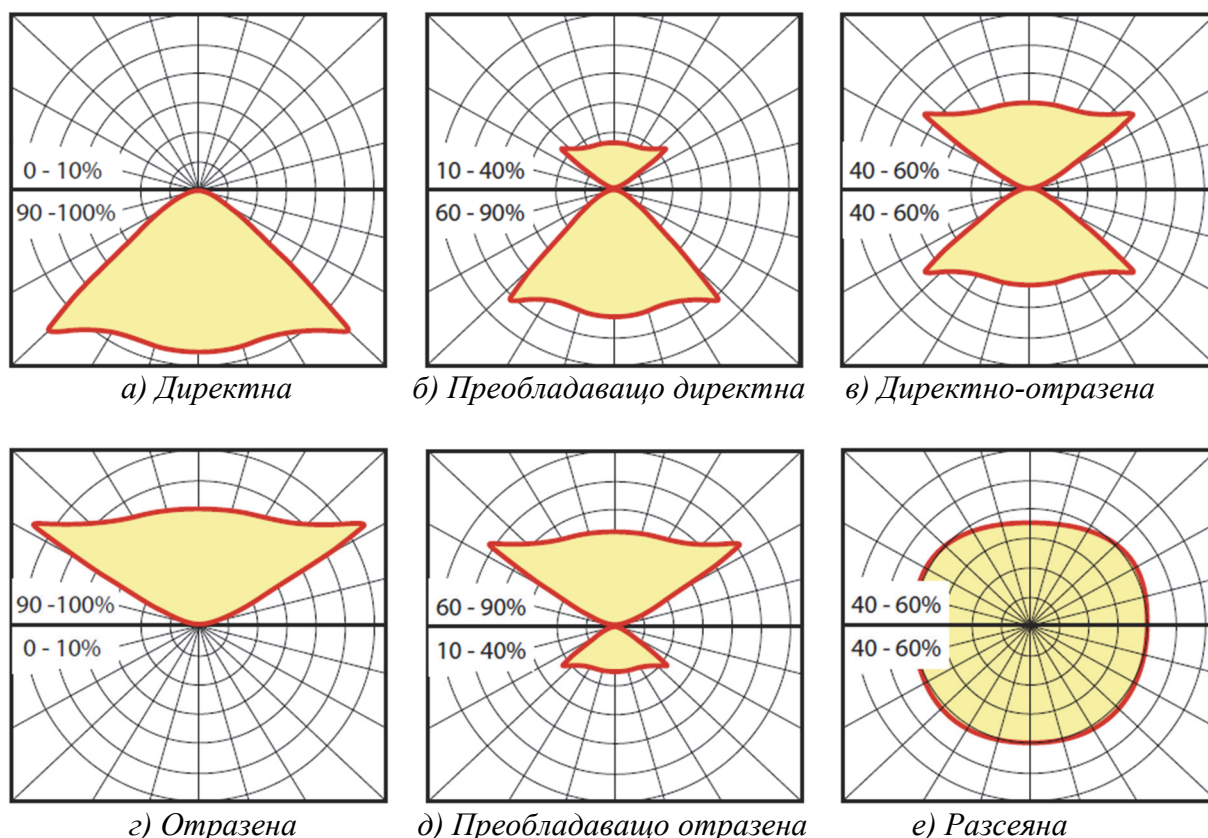
$$k_y = \frac{I_{max}}{I_{л,ср}}, \quad (18.2)$$

където: I_{max} – максимален интензитет на светлината на СРК на осветителя, в [cd]; $I_{л,ср}$ – среден интензитет на светлината на лампата, в [cd]. Стойността

на $I_{л,ср}$ се определя с отношението: $I_{л,ср} = \frac{\Phi_{л}}{4\pi}$, където $\Phi_{л}$ – светлинен поток на лампата, в [lm].

б) Разпределение на светлинния поток между горна и долна полусфера на пространството.

В зависимост от разпределението на светлинния поток в пространството, т.е. от отношението на светлинния поток, излъчен в долната полусфера $\Phi_{\downarrow}$ към целия излъчван светлинен поток $\Phi_{\uparrow}$, осветителите се класифицират в шест класа: с директна светлина (фиг. 18.3а) – $(\Phi_{\downarrow}/\Phi_{\uparrow}) > 0,8$; с преобладаващо директна светлина (фиг. 18.3б) – $0,6 < (\Phi_{\downarrow}/\Phi_{\uparrow}) \leq 0,8$; с директно-отразена (смесена) светлина (фиг. 18.3в) – $(\Phi_{\downarrow}/\Phi_{\uparrow}) \approx 0,5$; с отразена светлина (фиг. 18.3г) – $(\Phi_{\downarrow}/\Phi_{\uparrow}) \leq 0,2$; с преобладаващо отразена светлина (фиг. 18.3д) – $0,2 < (\Phi_{\downarrow}/\Phi_{\uparrow}) \leq 0,4$; с разсеяна светлина (фиг. 18.3е) – $0,4 < (\Phi_{\downarrow}/\Phi_{\uparrow}) \leq 0,6$.



Фиг. 18.3. Класификация на осветителите по отношение на разпределение на светлинния поток в пространството

в) Коефициент на полезно действие на осветителя и коефициент на използване на светлинния поток

Отражението на светлинния поток на лампата (лампите) в отражателя, преминаването му през разсейвателя или лещата води до загуби на светлинен поток в тези елементи на оптичната система на осветителя. Количествено загубите на светлинен поток в елементите на оптичната система и в други елементи в осветителя могат да се оценят с *коефициента на полезно действие $\eta_{осв}$ на осветителя*. КПД на осветителя се дефинира с отношението на изходния (излъчен и полезен) светлинен поток от осветителя към общия светлинен поток на всички лампи в осветителя:

$$\eta_{осв} = \frac{\Phi_{осв}}{\Phi_{л}}, \quad (18.3)$$

където: $\Phi_{осв}$ – изходен светлинен поток, напуснал осветителя, в [lm]; $\Phi_{л}$ – светлинен поток на лампата или лампите в осветителя, в [lm].

КПД на осветителя оценява ефективността на осветителя при напускане на светлинния поток във всички покоси. За количествена оценка на осветяването на определена работна повърхност от лампите в осветителя се въвежда *коефициент на използване на светлинния поток UF*. Той се използва за количествена оценка на ефективността на осветителите в помещение с фиксирана работна повърхност. Частта от светлинния поток, излъчван от осветителя директно към работната повърхност допринася най-много за осветеността на тази работна повърхност. Излъчваният в други посоки (към стените, тавана и мебелите) светлинен поток допринася само индиректно за осветеността на работната повърхност чрез многократните отражения в помещението [25,40,45,84]. Коефициентът на използване на светлинния поток на осветителите в помещение с определена работна повърхност се определя с израза:

$$UF = \frac{\Phi_{pn,dip} + \Phi_{pn,omp}}{\sum_{i=1}^n \Phi_{л,i}} = \frac{\Phi_{pn}}{\sum_{i=1}^n \Phi_{л,i}}, \quad (18.4)$$

където: $\Phi_{pn,dip}$ – светлинен поток, излъчен от лампите на осветителите и директно попадащ върху работната повърхност, в [lm]; $\Phi_{pn,omp}$ – светлинен поток, попадащ върху работната повърхност след многократно отражение от таван, стени и под, в [lm]; $\sum_{i=1}^n \Phi_{л,i}$ – светлинен поток на всички лампи в осветителите, които се намират в помещението.

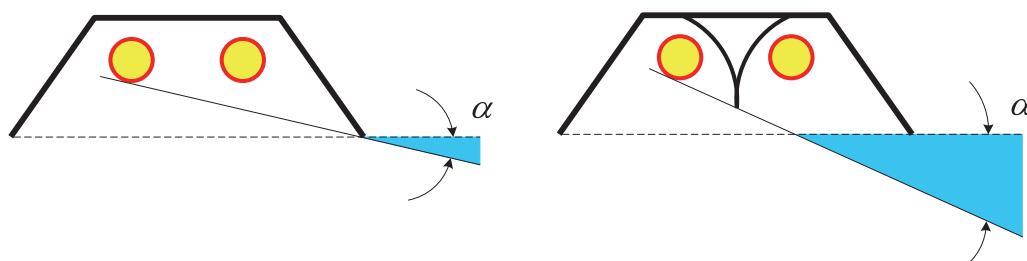
г) Разпределение на яркостта на светещите части на осветителя и защитен ъгъл

Освен да преразпределят светлинния поток, осветителите също така и защитават очите от високите яркости и ограничават заслепяването. Заслепяването, което може да се прояви като дискомфортно или като физиологично, има неблагоприятен ефект върху наблюдателя и може да намали видимостта на обектите.

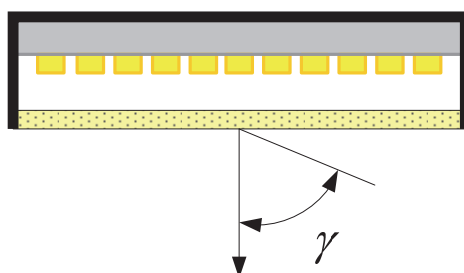
Яркостта на осветителя може да се намали чрез екраниране на светлинните източници посредством отражатели, защитни решетки, разсейватели или оптични лещи. Отражателите и непрозрачните екраниращи решетки защитават очите от директно заслепяване, разсейвателите намаляват яркостта, а лещите променят посоката на светлинния поток от лампите.

Ограничаване на заслепяването може да се постигне чрез подходящо екраниране на лампите в осветителите. Въвежда се т.нар. *минимален защитен ъгъл α* . За конвенционални осветители (например осветители с луминесцентни лампи) и оптична система с насочено (огледално) отражение, при които източникът на светлина се вижда директно, минималните защитни ъгли в зрителното поле се прилагат за определени стойности на яркостта на лампата, илюстрирано на фиг. 18.4 и посочени в табл. 18.1 [8].

За осветители (например осветители с LED), при които директният изглед към светлинните източници се екранира посредством оптична система с дифузно разсейване на светлината, се прилага *максимална средна яркост на осветителя*, ограничена за стойности на *вертикалния фотометричен ъгъл γ* , посочени в табл. 18.2 и илюстрирано на фиг. 18.5 [8].



Фиг. 18.4. Защитен ъгъл α на осветители с различни варианти на оптичната система



Фиг. 18.5. Светеща част от LED осветител и вертикален фотометричен ъгъл γ , за който се ограничава яркостта

Таблица 18.1. Минимални защитни ъгли α за определени яркост на лампите в осветителя

Яркост на лампата, [kcd/m ²]	Минимален защитен ъгъл α
20 до < 50	15°
50 до < 500	20°
≥ 500	30°

Таблица 18.2. Максимална средна яркост на светещ елемент при определени вертикални ъгли γ

Вертикален фотометричен ъгъл γ	Максимална средна яркост на светещ оптичен елемент, [kcd/m ²]
$75^\circ \leq \gamma < 90^\circ$	≤ 20
$70^\circ \leq \gamma < 75^\circ$	≤ 50
$60^\circ \leq \gamma < 70^\circ$	≤ 500

18.2. Степен и клас на защита на осветителите

Системата IP (Ingress Protection) е разработена от IEC 60529 и определя различните степени на защита на осветителите от проникване на други тела, прах и влага. Понятието „други тела“ включва в себе си предмети, като инструменти и пръсти на ръцете, които могат евентуално да докоснат тоководещите части [16,27,73].

Обозначаването на степента на защита се състои от характерните букви IP, последвани от две цифри. Първата цифра показва степента на защита от прах и твърди тела, а втората цифра показва степента на защита от влага. В табл. 18.3 е описано значението на отделните цифри, които съответстват на определени условия.

Табл. 18.3. Степен на защита от проникване на твърди тела, прах и вода

Първа цифра – защита от прах и твърди тела		Втора цифра – защита от вода	
0	Няма защита	0	Няма защита
1	Защита от твърди тела с размер, по-голям от 50 mm	1	Защита от капки вода, падащи вертикално
2	Защита от твърди тела с размер, по-голям от 12 mm	2	Защита от капки вода, падащи под ъгъл 15° към вертикалата
3	Защита от твърди тела с размер, по-голям от 2,5 mm	3	Защита от дъжд
4	Защита от твърди тела с размер, по-голям от 1 mm	4	Защита от пръскаща вода
5	Защита от прах	5	Защита от водна струя
6	Пълна защита от прах	6	Защита от мощна водна струя под високо налягане
		7	Защита от краткотрайно (до 1 min) потапяне във вода (до 1 m)
		8	Защита от потапяне във вода с дълбочина над 1 m и за повече от 30 min

Уличните, тунелните и промишлените осветители имат по-висока степен на защита от осветителите за обществени и жилищни сгради. Например: уличен осветител с типична степен на защита IP66 има пълна защи-

та от прах и защита от водна струя под високо налягане; офисен осветител с типична степен на защита IP20 има защита от твърди тела с размер над 12 mm и без защита от проникване на влага.

Удароустойчивостта определя класа на защитата на осветителите от външни механични удари и се описва от БДС EN 62262 с код IK. Обвивката на осветителя трябва да издържи механичен удар с определена енергия без загуба на електрическата и механическата безопасност и нарушаване на основните работни характеристики. Това означава, че след ударните въздействия са допустими деформации на отражателя или корпуса на осветителя, но лампите трябва да останат цели, а осветителят напълно да удовлетворява изискванията на съответната степен на защита IP и клас на защита по отношение на електробезопасност [27].

Обозначаването на класа на защита се състои от характерните букви IK, последвани от две цифри. Този код изразява определена енергия на удара (ударна якост) в джаули [J]. В табл. 18.4 са посочени десет класа на защита на осветителите от механични удари и съответната стойност на енергията в [J]. Към най-високия клас на постигната защита се отнасят вандало-защитените и вандало-устойчивите осветители.

Табл. 18.4. Клас на защита на осветителите от механични удари - IK

Код	Енергия на удара, [J]	Описание
IK00	-	Няма защита срещу механични удари
IK01	0,15	Може да издържи на леки удари от малки предмети, например леко надраскване с инструмент
IK02	0,2	Стандартен (отворен осветител; затворен осветител с плафониера от полиметилметакрилат)
IK03	0,3	Устойчив на удар с предмет като топка за тенис, изпусната от малка височина.
IK04	0,5	По-усилен от стандартния (отворен осветител с усилен оптична система)
IK05	0,7	Издържаш на удар с лека пръчка или падане на предмет с малка маса от малка височина
IK06	1	Може да понесе удар от предмет като малка топка за футбол, паднала от височина 0.5 метра
IK07	2	Усилен осветител, който може да издържи на удар от 500-грамов чук, пуснат от височина 0.4 метра
IK08	5	Вандало-защитен осветител (например затворена плафониера от поликарбонат или удароустойчиво стъкло)
IK09	10	Може да издържи на значителни удари, като падане на 5 кг обект от височина 0.2 метра
IK10	20	Вандало-устойчив осветител който може да издържи на сериозни удари, като тези от чук (например уличен осветител или осветител за обществен транспорт)

При нормални условия на експлоатация и при обслужване, осветителите трябва да се осигуряват срещу поражения от електрически ток. Безо-

пасността на осветителите в нормален и аварийен режим се определя от електрическите, механичните и топлинните характеристики. Осветителите се класифицират в съответствие с типа на защита от поражения от електрически ток [16,27]. В табл. 18.5 са дадени класовете на защита на осветителите по отношение на електробезопасността. Само класове на защита I, II и III са одобрени в Европейския съюз и други индустриализирани страни. Символите са определени в IEC 60417.

*Табл. 18.5. Клас на защита на осветителите от отношение на електро-
безопасността*

Клас на защита	Символ	Защита
0		Само обща изолация (не се препоръчва)
I		Обща изолация със защитна заземяваща клема
II		Двойна или усилена изолация, защитно заземление не се изисква
III		Захранване със свръхниско напрежение (променливо или постоянно $U \leq 25 \text{ V}$ от източник със защитно разделяне)

Стандартът БДС EN 60598-1 определя областите на приложение на осветителите в зависимост от възпламеняемостта на повърхностите. Нормално възпламеняемите повърхности най-често са от дървен материал с дебелина над 2 mm. В табл. 18.6 са показани областите на използване на осветителите в зависимост от символа за възпламеняемост F.

*Табл. 18.6. Области на използване на осветителите в зависимост от въз-
пламеняемостта*

Символ	Област на използване	Характеристики на материала на тавана
Няма	За поставяне на не възпламеняваща се повърхност	Камък, бетон
	За поставяне на нормално възпламеняваща се повърхност	Материали с температура на възпламеняване $> 200^\circ$ със закъсняване на възпламеняването
	За поставяне на леко възпламеняваща се повърхност	Материали с температура на възпламеняване $< 200^\circ$ без закъсняване на възпламеняването
	Осветители за вграждане, подходящи за покриване на празнината в тавана	Топлоизолационен материал, който не причинява прегряване на осветителя

19. КОНТРАСТ И ВИДИМОСТ. ЗАСЛЕПЯВАНЕ. ПУЛСАЦИИ НА СВЕТЛИННИЯ ПОТОК. ФОТОБИОЛОГИЧНА БЕЗОПАСНОСТ НА ЛАМПИ И ОСВЕТИТЕЛИ

Светлотехническите изисквания се определят чрез удовлетворяване на три основни човешки потребности: зрителен комфорт, при който наблюдателите имат усещането за удобство и той по косвен начин също допринася за по-високо ниво на продуктивност и по-високо качество на работа; зрителна работоспособност, при която наблюдателите са в състояние да изпълняват своите зрителни задачи, дори при тежки обстоятелства и за продължителни периоди от време; безопасност. Разглеждат се някои показатели на изкуственото осветление, които трябва да удовлетворяват горепосочените потребности.

19.1. Яркостна разлика, яркостен контраст, чувствителност и видимост

Различните дейности включват различни визуални задачи. В случай на ахроматични или еднакви по цвят обект и фон различаването на обекта се основава на разликата в техните яркости. Минималната разлика между яркостите на обекта L_o и на неговия фон L_B , която може да се възприеме от човешкото око, се нарича *прагова яркостна разлика* ΔL_{th} :

$$\Delta L_{th} = (L_o - L_B)_{min}. \quad (19.1)$$

Големината на праговата разлика се определя от яркостта на фона, ъгловия размер на наблюдавания обект и предоставеното време за различаване [19].

За характеризиране способността на окото да различава яркостни разлики се използва и величината *прагов контраст* C_{th} :

$$C_{th} = \frac{\Delta L_{th}}{L_B} = \frac{(L_o - L_B)_{th}}{L_B}. \quad (19.2)$$

Яркостта на фона L_B може да се приеме и като адаптационна яркост L_a , когато ъгловият размер на обекта е от порядъка на минути ($L_B = L_a$). Праговият контраст е функция на яркостта на фона, ъгловия размер на обекта, предоставеното време за различаване и вероятността за сигурно възприемане. Праговият контраст зависи от спектралните характеристики на светлинните източници, но разликите са незначителни и обикновено те не се взимат пред вид при нормиране на нивото на осветеност и оценка на видимостта.

Реципрочната стойност на праговия контраст се нарича *контрастна чувствителност* S_c и също намира приложение за оценка на чувствителността на окото да възприема яркостни разлики. Тя се определя с израза:

$$S_c = \frac{1}{C_{th}} = \frac{L_B}{\Delta L_{th}}. \quad (19.3)$$

Действителните условия за различаване на наблюдаваните обекти количествено се характеризират с величината *яркостен контраст* C :

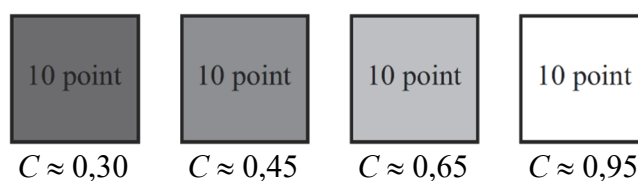
$$C = \frac{L_o - L_B}{L_B} = \frac{\Delta L}{L_B}, \quad (19.4)$$

където L_o и L_B са действителните яркости на обекта и фона, ΔL – действителна яркостна разлика. Поради това контрастът, определен с израз (19.4), се нарича обективен или реален, докато праговият контраст е субективен, тъй като той зависи от зрителните способности на окото. Колкото е по-голям обективният контраст, толкова по-интензивно е зрителното усещане и по-сигурно възприемането на яркостната разлика [19,45].

Яркостният контраст C е положителен при $L_o > L_B$, а отрицателен – при $L_o < L_B$. Той може да приема следните стойности:

- при $L_o > L_B$, то $0 < C < \infty$;
- при $L_o < L_B$, то $-1 < C < 0$.

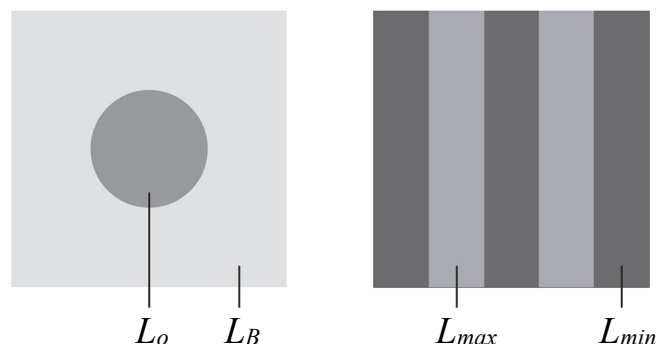
На фиг. 19.1 са показани приблизителни стойности на яркостния контраст C (стойностите са приблизителни поради влиянието на печатния процес) [45].



Фиг. 19.1. Различни стойности на яркостния контраст

На фиг. 19.2 са показани два различни типа визуални задачи: отляво – откриване на обект с еднаква яркост L_o , наблюдаван на неговия фон, също с еднаква яркост L_B ; отдясно – откриване на фини детайли с редуващи се максимални L_{max} и минимални L_{min} яркости.

Яркостният контраст е основна характеристика на зрителния анализатор и се използва за различаване на обектите. Затова в нормирането на изкуственото осветление като главен показател се използва яркостният контраст.



Фиг. 19.2. Различен тип визуални задачи

Препоръчително е при проектиране на вътрешни осветителни уредби съотношението на яркостите на работната повърхност и стените да бъде по-малко от 5:1. За постигане на добър визуален комфорт средната яркост на стените не трябва да бъде по-ниска от 30 cd/m^2 [41].

За количествена оценка на конкретните условия за виждане на определен обект се въвежда показателят *видимост* F_{VL} . Видимостта се определя с отношението на действителната яркостна разлика ΔL и праговата яркостна разлика ΔL_{th} [19,63]:

$$F_{VL} = \frac{\Delta L}{\Delta L_{th}} = \frac{L_o - L_B}{(L_o - L_B)_{th}} = \frac{C}{C_{th}}. \quad (19.5)$$

Видимостта на обектите се определя главно от съществуващия контраст между тях и фона. Колкото по-голям е обективният яркостен контраст C между обекта и фона в сравнение с праговия яркостен контраст C_{th} , толкова по-ясно, сигурно и бързо се вижда обектът (фиг. 19.3). Видимостта може да се разглежда като брой на праговите яркостни разлики ΔL_{th} , които се включват в действителната яркостна разлика ΔL , съгласно израз (19.5). Следователно видимостта е мерно число на запаса на конкретните условия за различаване на обекта спрямо праговата яркостна разлика.



а) Видимост при ясно време

б) Намалена видимост при мъгла

Фиг. 19.3. Видимост при различно съотношение на C и C_{th}

19.2. Заслепяване

Попадалият от светлинните източници и (или) отразеният от огледални повърхности светлинен поток в човешкото око може да причини съществено намаляване на контрастната чувствителност, видимостта на обектите, остротата на зрение, бързината на различаване и увеличаване на зрителната умора и др. Това понижаване на зрителната способност при наличие на ярки светлинни източници в зрителното поле се нарича *заслепяване*. В настоящия учебник се разглежда заслепяването, причинявано от осветителните уредби.

При повишаване адаптационната яркост L_a се увеличава праговата яркостна разлика ΔL_{th} и следователно се намалява видимостта при $L_o - L_B = \text{const}$. Заслепяващото действие на светлинните източници се разглежда като равностойно на действието на светлинен воал с яркост L_v , разположен между наблюдателя и обекта и фона. През светлинния воал наблюдателят вижда обекта и фона с повишена яркост, в резултат на което яркостният контраст намалява при поява на заслепяващи източници [19].

Заслепяването може да се прояви като дискомфортно (психологическо), т.е. като *яркостен дискомфорт*, или като *физиологично заслепяване*. Първоначално яркостният дискомфорт и заслепяването се дефинират и оценяват като два отделни показателя.

Яркостният дискомфорт може да се определи по различни методи, най-разпространените от които са метод на Гът, метод на Епанешников и метод на граничните яркостни криви, разработени от Зьолнер [19]. Яркостният дискомфорт се причинява както от заслепяващото действие на осветителите на вътрешната осветителна уредба, така и от неблагоприятното съотношение между яркостите на работната повърхност, тавана, стените и пода на помещението.

а) Заслепяване във вътрешни осветителни уредби

През 1995 г. CIE комбинира различните методи в една формула за количествена оценка на заслепяването, причинявано от осветители на вътрешна осветителна уредба. Методът е табличен и се нарича „CIE Unified Glare Rating (UGR)“ – *обобщена степен на заслепяване* R_{UG} . Той се основава на следната формула:

$$R_{UG} = 8 \log_{10} \left(\frac{0,25}{L_B} \sum \frac{L_{ocv}^2 \Omega}{p^2} \right), \quad (19.6)$$

където: R_{UG} – обобщена степен на заслепяване; L_B – яркост на фона, изчислена като E_{ind}/π , където E_{ind} е вертикална индиректна осветеност спрямо окото на наблюдателя, в $[cd/m^2]$; L_{ocv} – яркост на светещите части на всеки осветител в посоката на окото на наблюдателя (габаритна яркост), в $[cd/m^2]$; Ω – пространствен ъгъл, под който светещите части на всеки осве-

тител се виждат от окото на наблюдателя, в [sr]; p – позиционен индекс на Гът – определя се таблично за всеки осветител в зависимост от неговото разположение спрямо позицията на наблюдателя и ориентацията на зрителната ос [25].

Методът CIE-UGR е най-широко разпространен за определяне на заслепяването от вътрешни осветителни уредби. Той е заложен в националните и международни стандарти. Методът е подходящ за повечето осветители с равномерно разпределение на яркостта.

Яркостта на светещата част на осветителя $L_{осв}$ в посока към окото на наблюдателя, който вижда светещата площ под ъгъл γ , е:

$$L_{осв} = \frac{I_{\gamma,\varphi}}{A'_{осв}}, \quad (19.7)$$

където: $I_{\gamma,\varphi}$ – интензитет на светлината, излъчван от центъра на видимата хоризонтална светещата площ на осветителя до точката на наблюдение, в [cd]; $A'_{осв}$ – видима светеща площ, в [cd/m²]. Ако е известна светещата площ на осветителя $A_{осв}$ и ъгълът γ , под който се вижда тази площ, то видимата площ е $A'_{осв} = A_{осв} \cos \gamma$. В израз (19.7) $L_{осв}$ има значение на средна яркост $L_{ср}$ и се отнася за осветители с равномерно разпределение на яркостта на излъчващата повърхност.

Когато характерът на зрителната задача в помещението изисква погледът на наблюдателя да бъде насочен предимно към работната повърхност, може да се приеме, че яркостта на фона е равна на адаптационната яркост, т.е. $L_B = L_a$.

Стойността на R_{UG} на вътрешната осветителната уредба не трябва да превишава максимално допустимата (ограничена) стойност R_{UGL} , дадена в точка 7.3 на БДС EN 12464-1:2021. Препоръчителните ограничителни стойности на R_{UGL} образуват скала, чиито степени характеризират значителни промени в заслепяването. Скалата на R_{UGL} е 16, 19, 22, 25, 28, където ниска стойност означава „малка вероятност от дискомфортно заслепяване“, а висока стойност означава „голяма вероятност за дискомфортно заслепяване“ [8].

Формула (19.6) е приложима, когато позицията на наблюдателя и посоката му на наблюдение по отношение на координатите на осветителите в помещението са известни. Стойностите на R_{UG} , изчислени по формулата, се използват за определяне на оптимална позиция на наблюдателя в помещението по отношение на заслепяването (позицията с $R_{UG} = \min$) [8]. Табличният метод за определяне на степента на заслепяване R_{UG} от вътрешна осветителна уредба може да се приложи, когато са налице следните условия и стандартни процедури при изчисляване [45]:

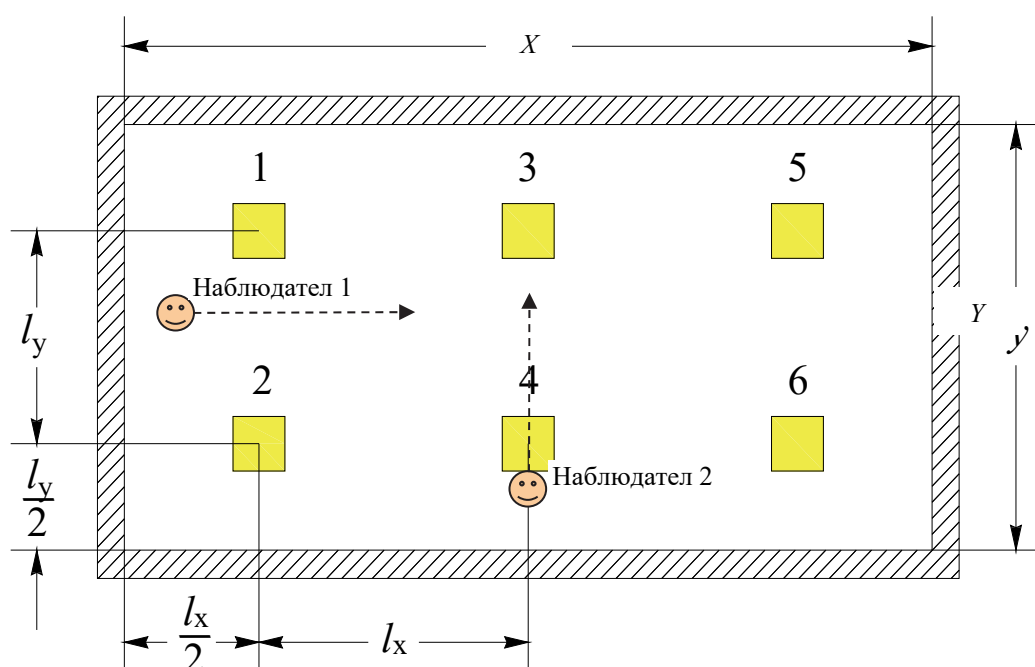
- помещението е с правоъгълна форма с размери X и Y (фиг. 19.4);

- R_{UG} се изчислява за стандартни наблюдатели, разположени в средата на всяка стена с хоризонтална зрителна ос към центъра на противоположната стена (височина на зрителната ос за седнал наблюдател е 1,2 m; за прав наблюдател – 1,6 m) – фиг. 19.4;

- разстоянието между крайните осветители и стените по осите x и y е два пъти по-малко от разстоянието l_x и l_y между всеки два съседни осветителя (фиг. 19.4);

- осветителите са еднотипни – с еднакво светлоразпределение, еднаква ориентация по фотометрична система $C-\gamma$ и еднакъв провод;

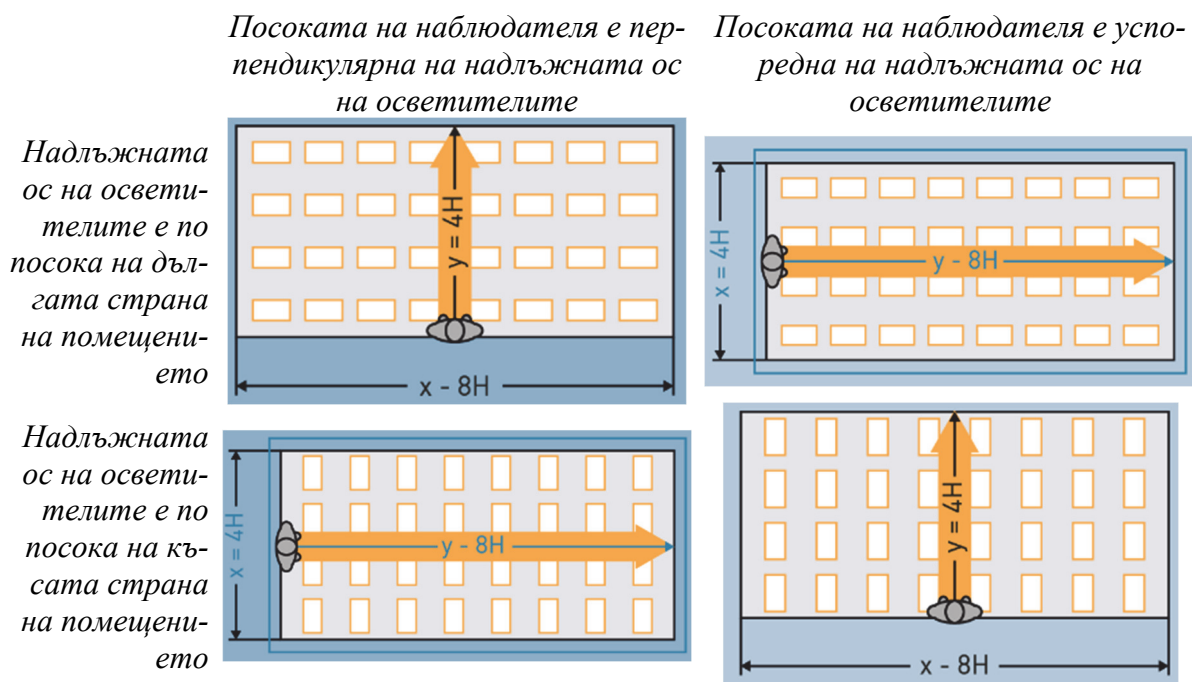
- съотношението между разстоянието l_x или l_y и височината H (вертикалното разстояние от нивото на зрителната ос до осветителя) е малко – 1:0,25 или 1:1.



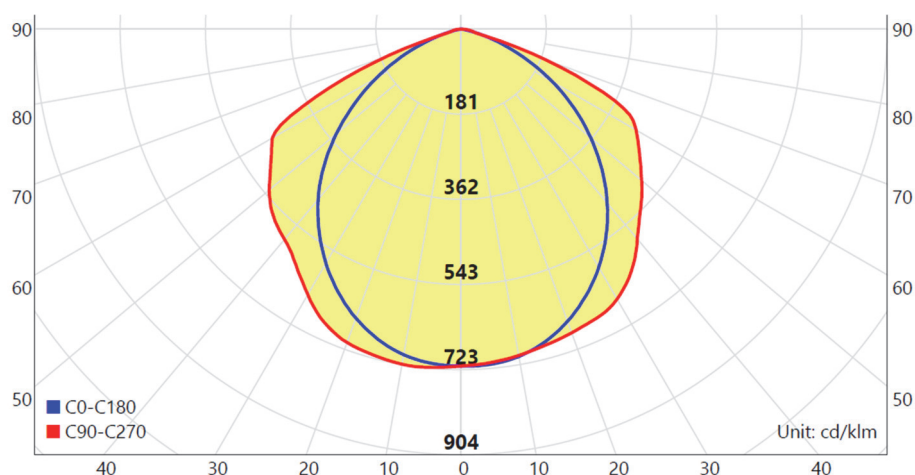
Фиг. 19.4. Разположение на осветителите и наблюдателите

Показателят обобщена степен на заслепяване R_{UG} зависи от позицията на наблюдателя спрямо масива от осветители и от яркостта на фона L_B , следователно и от коефициента на отражение ρ на повърхността на помещението. Тези параметри зависят от осветителната уредба. Поради тази причина показателят R_{UG} не може да бъде определен за осветител като самостоятелен обект, а се отчита цялата осветителна уредба с геометричната конфигурация на помещението и разположението на наблюдателя.

CIE 190:2010 дефинира 19 конфигурации на помещения с пет различни варианта на коефициентите на отражение на повърхността на помещението, представено във вид на UGR-таблицы, с отчитане на фотометричните данни на осветителите. На фиг. 19.5 са показани стандартизирани разположения на осветителите по табличния UGR метод.



Фиг. 19.5. Стандартизирано разположение на осветителите по табличния UGR метод

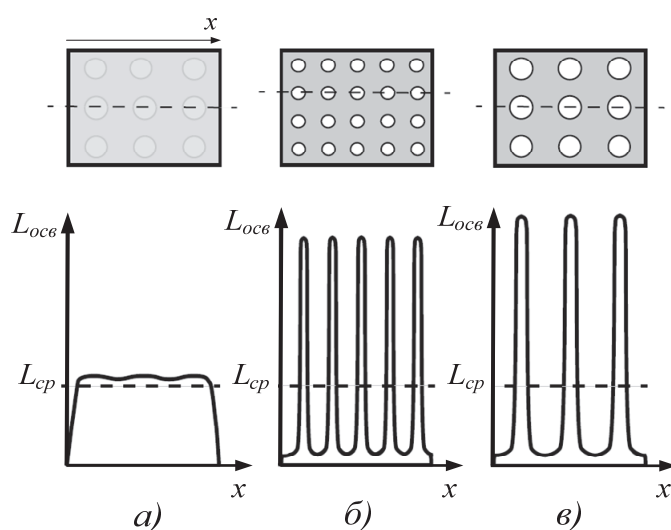


Фиг. 19.6. СРК на осветител, използван за определяне на показателя R_{UG} по табличния UGR метод

В табл. 19.1 са показани резултати от изчислени стойности на показателя R_{UG} по табличния UGR-метод на вътрешна осветителна уредба с осветители, чиято СРК е показана на фиг. 19.6. Правоъгълните форми на помещението се дават с размери X и Y , спрямо височината на осветителя H (приема се, че $H = 2 \text{ m}$ – лявата част на табл. 19.1). Коефициентите на отражение ρ (Reflectance) са дадени съответно за тавана (Ceiling), стените (Walls) и референтна повърхност (Reference plane) (горната част на табл. 19.1). Коефициентът на отражение на базовата равнина е средната стойност на коефициентите на отражение на работната равнина и видимите части на пода.

Табл. 19.1. Изчислени стойности на показателя R_{UG} по табличния UGR-метод на вътрешна осветителна уредба

Reflectance										
Ceiling (cavity)	0.7	0.7	0.5	0.5	0.3	0.7	0.7	0.5	0.5	0.3
Wall	0.5	0.3	0.5	0.3	0.3	0.5	0.3	0.5	0.3	0.3
Reference plane	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Room dimensions	Viewed crosswise					Viewed endwise				
X=2H Y=2H	14.0	15.6	14.4	15.9	16.2	16.1	17.7	16.5	18.0	18.3
3H	15.1	16.5	15.5	16.8	17.2	17.7	19.2	18.1	19.5	19.8
4H	15.2	16.6	15.6	16.9	17.3	17.8	19.1	18.2	19.5	19.8
6H	15.2	16.4	15.6	16.8	17.2	17.7	19.0	18.2	19.3	19.7
8H	15.2	16.3	15.6	16.7	17.1	17.7	18.9	18.2	19.3	19.7
12H	15.1	16.3	15.6	16.6	17.1	17.7	18.8	18.1	19.2	19.7
X=4H Y=2H	15.0	16.3	15.4	16.7	17.0	16.5	17.9	16.9	18.2	18.6
3H	16.3	17.4	16.7	17.8	18.2	18.3	19.4	18.7	19.8	20.2
4H	16.4	17.4	16.9	17.8	18.3	18.4	19.4	18.8	19.8	20.2
6H	16.4	17.3	16.9	17.7	18.2	18.4	19.2	18.8	19.7	20.1
8H	16.4	17.2	16.8	17.6	18.1	18.4	19.2	18.8	19.6	20.1
12H	16.3	17.1	16.8	17.5	18.0	18.4	19.1	18.8	19.5	20.0
X=8H Y=4H	16.6	17.4	17.0	17.8	18.3	18.4	19.2	18.9	19.7	20.1
6H	16.5	17.2	17.0	17.7	18.2	18.4	19.1	18.9	19.6	20.0
8H	16.5	17.1	17.0	17.6	18.1	18.4	19.0	18.9	19.5	20.0
12H	16.5	17.0	17.0	17.5	18.0	18.4	18.9	18.9	19.4	20.0
X=12H Y=4H	16.5	17.3	17.0	17.7	18.2	18.4	19.1	18.9	19.6	20.1
6H	16.5	17.1	17.0	17.6	18.1	18.4	19.0	18.9	19.4	20.0
8H	16.5	17.0	17.0	17.5	18.0	18.4	18.9	18.9	19.4	19.9



Фиг. 19.7. LED осветители с равномерна (а) и неравномерна (б,в) излъчваща повърхност

Най-високите (най-неблагоприятните) стойности на показателя R_{UG} за тези стандартни наблюдатели се приемат за реализирани от цялата осветителна уредба и се сравняват с дадените в точка 7.3 на БДС EN 12464-1:2021 за съответното помещение (зрителна дейност). С въвеждането на светодиодите във вътрешното осветление ситуацията се промени и методът CIE-UGR за определяне на заслепяването е неудобен. Причината е в неравномерното разпределение на яркостта по излъчващата повърхност на много от LED осветителите.

Съществуват изследвания, при които се получава една и съща стойност на показателя R_{UG} при осветители с равномерно и неравномерно излъчваща повърхност, но оценката от заслепяващото въздействие върху наблюдателите е различна [45]. Несъответствието е от еднаквата стойност на средната яркост $L_{ср}$, която се получава за осветителите с равномерно и неравномерно излъчваща повърхност (фиг. 19.7). На фиг. 19.7а е показан LED осветител с разсейвател, осигуряващ равномерно разпределение на яркостта по дължината x ; на фиг. 19.7б,в – LED осветители с прозрачни

повърхности, имащи неравномерно разпределение на яркостта. Въпреки това и трите осветителя имат еднаква средна яркост L_{cp} .

Проведените изследвания предлагат решение, базирано на вътрешния контраст на разпределението на яркостта C_i на източника на заслепяване, изразено чрез стандартното отклонение на изменението на яркостта S_{td} върху светлоизлъчващата площ на източника:

$$C_i = \frac{S_{td}}{L_{cp}}. \quad (19.8)$$

Въвежда се нова яркост на източника на заслепяване, L_{UNI} , която се изчислява от средната яркост L_{cp} на източника и стойността на контраста C_i чрез израза:

$$L_{UNI} = (C_i + 1)^{\frac{a}{16}} L_{cp}, \quad (19.9)$$

където: $a = 11$ – скалиращ фактор, чиято стойност е базирана на данните от изследванията [45].

За оценка на степента на заслепяване с отчитане на неравномерното разпределение на яркостта на светлинните източници формула (19.6) се променя, както следва:

$$R_{UG,UNI} = 8 \log_{10} \left(\frac{0,25}{L_B} \sum \frac{L_{UNI}^2 \Omega}{p^2} \right), \quad (19.10)$$

б) Заслепяване във външни осветителни уредби и осветителни уредби на спортни съоръжения

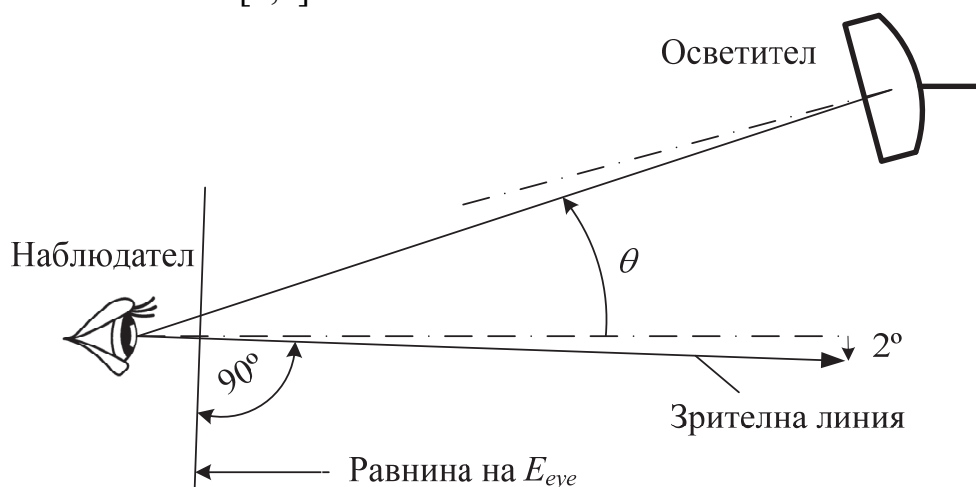
Заслепяването директно от осветители на външна осветителна уредба и на спортни съоръжения трябва да се определи, като се използва метод CIE Glare Rating (R_G), който се основава следната формула:

$$R_G = 27 + 24 \log_{10} \left(\frac{L_{v|}}{L_{ve}^{0,9}} \right), \quad (19.11)$$

където: $L_{v|}$ – обща воалираща яркост, в $[cd/m^2]$, причинена от осветителната уредба и представлява сумата от воалиращите яркости на всеки индивидуален осветител ($L_{v|} = L_{v1} + L_{v2} + \dots + L_{vn}$); L_{ve} – еквивалентна воалираща яркост на околната среда, в $[cd/m^2]$.

Воалиращата яркост на индивидуалния осветител се изчислява като $L_v = 10(E_{eye} \theta^2)$, където E_{eye} е осветеността на нивото на окото на наблюдателя в равнина, перпендикулярна на зрителната линия (ос) с ъгъл 2° под хоризонта спрямо окото на наблюдателя (фиг. 19.8); θ – ъгъл между зри-

телната линия на наблюдателя и посоката на светлината, падаща от индивидуалния осветител [7,9].



Фиг. 19.8. Ъгъл между зрителната линия на наблюдателя и посока на падащата от индивидуалния осветител светлина

Приемайки, че отражението от околната среда е изцяло дифузно, то еквивалентното воалиращо отражение от околната среда може да се изчисли като $L_{ve} = 0,035 \rho E_{h,cr} \pi^{-1}$, където ρ е средният коефициент на отражение, а $E_{h,cr}$ е средната хоризонтална осветеност на площта. Когато стойността на коефициента на отражение е неизвестна, то може да се приеме $\rho = 0,15$.

в) Заслепяване от улични осветителни уредби

Физиологичното заслепяване от светлинните източници най-силно влияе върху контрастната чувствителност на окото и видимостта на наблюдавания обект. Заслепящото въздействие може да се разглежда като светлинен воал с яркост L_{ve} , разположен между наблюдавания обект и фона. Тази яркост представлява еквивалентна воалираща яркост. Относителното нарастване на прага показва колко трябва да се увеличи контрастът на обектите, когато определен брой осветители са в зоната на наблюдаваното поле, по отношение на контраста, когато тези осветители са извън наблюдаваното поле (не създават директно заслепяване) [27].

Съгласно публикация CIE 140:2019 – Road Lighting Calculations, за изчисляване на показателя на заслепяване f_{TI} , причинен от улични осветителни уредби, се използва следната формула:

$$f_{TI} = 65 \frac{L_{ve}}{(\bar{L}_i)^{0,8}}, [\%], \quad (19.12)$$

където: $\bar{L}_i$ – начална средна яркост на пътя, в $[\text{cd}/\text{m}^2]$; L_{ve} – еквивалентна начална воалираща яркост, в $[\text{cd}/\text{m}^2]$.

Формула (19.12) се изчислява предимно за светлотехнически класове М, където нормирането е по яркост [12]. Формулата е валидна за начална средна яркост на пътя в интервала $(0,05 < \bar{L}_i \leq 5) \text{ cd/m}^2$. Еквивалентна начална воалираща яркост се изчислява, както следва:

$$L_{ve} = \sum_{k=1}^{n_o} L_{vk}, \quad (19.13)$$

където приносът на поредния k -осветител с воалираща яркост L_{vk} е:

$$L_{vk} = 9,86 \left[1 + \left(\frac{A_y}{66,4} \right)^4 \right] \frac{E_k}{\theta_k}, \quad (19.14)$$

когато: $1,5^\circ < \theta_k \leq 60^\circ$ или:

$$L_{vk} = E_k \left(\frac{10}{\theta_k^3} + \left[\frac{5}{\theta_k^2} \right] \left[1 + \left(\frac{A_y}{62,5} \right)^4 \right] \right), \quad (19.15)$$

когато: $0,1^\circ < \theta_k \leq 1,5^\circ$.

Значението на величините във формули (19.13), (19.14) и (19.15) е следното: E_k – осветеност, създадена от k -тия осветител, когато той е в равнина, перпендикулярна на зрителната линия и на височината на окото на наблюдателя (обикновено тя е 1,5 m), в [lx]; θ_k – ъгъл, сключен между линията на погледа на наблюдателя и линията от наблюдателя към центъра на k -тия осветител, в $[\circ]$; n_o – брой на включените в изчисляването осветители; A_y – възраст на наблюдателя (в години) – обикновено при проектиране на улични осветителни уредби $A_y = 23$ години.

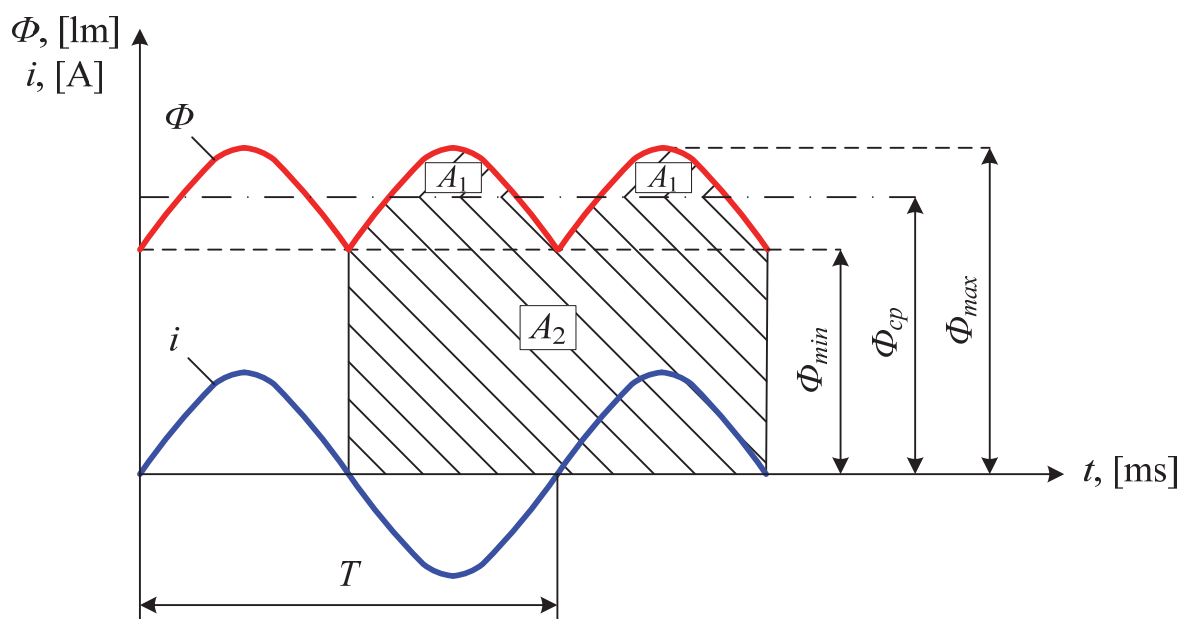
Формула (19.15) е въведена, за да се решат редките случаи, когато осветителите се намират много близо до линията на погледа на наблюдателя. Това обстоятелство не бе изследвано в предишните стандарти [12].

За светлотехнически класове С и Р основното изискване е за средната хоризонтална осветеност и яркостта обикновено не се изчислява.

19.3. Пулсации на светлинния поток

Всички светлинни източници, които работят на променлив ток i , излъчват светлинен поток Φ , който се изменя периодично с честота, равна на удвоената честота на електрическата мрежа (100 Hz). Характерът на пулсациите на светлинния поток (фиг. 19.9) зависи от вида на светлинния източник (лампата), вида на ПРА и начина на свързване. Лампите с нажежаема спирава имат значителна топлинна инерция и светлинният поток пулсира незначително. Разрядните лампи се характеризират със значително

по-голяма неравномерност на излъчването, тъй като светлинният поток почти напълно повтаря формата на пулсациите на тока, протичащ през лампата. По-благоприятна характеристика в това отношение имат разрядните лампи с луминофор – люминесцентни лампи, живачни лампи с коригиран спектър и др. Вследствие на характерното за луминофора послесветене, пулсациите на светлинния поток се намаляват значително [19,41]. Пулсациите на светлинния поток на светодиодните осветители се определя от схемата и елементите на драйвера; с наличието на изглаждащ кондензатор пулсациите значително намаляват.



Фиг. 19.9. Пулсации на светлинния поток на лампи, захранвани с променливо напрежение с честота 50 Hz

Моментната стойност на светлинния поток с достатъчна точност може да се определи с израза:

$$\Phi(t) = \Phi_{min} + \Delta\Phi(\sin^n \omega t), \quad (19.16)$$

където: $\Phi(t)$ – моментната стойност на светлинния поток, в [lm]; Φ_{min} – минимална моментна стойност на светлинния поток, в [lm]; Φ_{max} – максимална моментна стойност на светлинния поток, в [lm]; $\Delta\Phi = \Phi_{max} - \Phi_{min}$ – амплитуда на изменение на светлинния поток; $\omega = 2\pi f$ – ъглова честота на захранващото напрежение, в [s⁻¹]; n – показател, чиято стойност зависи от формата на кривата.

Пулсациите на светлинния поток са един от показателите за качество на изкуственото осветление. За количествена оценка на амплитудата на пулсациите на светлинния поток се въвежда *коефициент на пулсации на светлинния поток* k_n , който може да се определи със следния израз:

$$k_n = \frac{\Phi_{max} - \Phi_{min}}{2\Phi_{cp}} \cdot 100, [\%], \quad (19.17)$$

където $\Phi_{cp} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \Phi(t) dt$ – средната стойност на светлинния поток за период $T = 0,02$ s при честота $f = 50$ Hz (фиг. 19.9).

За коефициента на пулсации на светлинния поток може да се използва и израз:

$$k_n = \frac{\Phi_{max} - \Phi_{min}}{\Phi_{max} + \Phi_{min}}, \quad (19.18)$$

при който грешката не е по-голяма от $(5 \div 10) \%$, в зависимост от формата на кривата на светлинния поток Φ .

За оценка на пулсациите на светлинния поток се въвежда и величината *индекс на пулсациите* I_F , който се определя от площите A_1 и A_2 , показани на фиг. 19.9, със следния израз:

$$I_F = \frac{A_1}{A_1 + A_2}. \quad (19.19)$$

Пулсациите оказват неблагоприятно влияние върху зрителните функции и работоспособността на хората. Колкото е по-голяма стойността на k_n , толкова по-чувствително е влошаването на зрителните функции. Пулсациите на светлинния поток могат да причинят стробоскопичен ефект, зрителна умора, главоболие, влошаване на зрителната способност, забележимо мигане и дискомфорт. Стробоскопичен ефект се получава, когато честотата на пулсациите е близка до честотата на движение (въртене или възвратно-постъпателно) на даден обект или е кратен на нея, при което може да се създаде илюзия, че обектът стои на едно място или се движи на забавени обороти. Този ефект може да бъде опасен в определени ситуации, например в промишлени среди, където движението на машинни части трябва да бъде ясно видимо от работниците.

След 2008 г. в осветителите с луминесцентни лампи се използват високофреkwентни електронни пусково-регулирущи апаратури с работна честота $f \approx 30$ kHz – толкова висока, че не се проявяват неблагоприятни зрителни и неврофизиологични въздействия и се предполага, че проблемът с пулсациите на светлинния поток е решен. В резултат на това, през 2011 г. се възприе идеята в нормативните документи на повечето европейски страни, включително и у нас, коефициентът на пулсациите на светлинния поток да не се нормира, но в някои държави k_n продължава да бъде нормиран. В актуалния БДС EN 12464-1:2021 се дефинира качествения показател „фликер“ P_{stLM} , представляващ периодични и непериодични колебания, причи-

нени от светлинен източник, от източника на захранването или от други фактори на въздействие [8,24,39].

С въвеждането на светодиодите във вътрешното осветление проблемът с пулсациите отново е актуален. Управлението на тока и напрежението към LED източниците се осъществява с драйвери. Съществуват различен тип драйвери, част от които работят на по-ниски честоти или съдържат компоненти с по-ниска работна честота, като причиняват забележими пулсации на светлинния поток. Възниква необходимостта от измерване и нормиране на пулсациите на светлинния поток на LED осветителите. На фиг. 19.10 е показана лабораторна постановка за измерване на пулсации на светлинния поток. Тя се състои от кълбов фотометър, в който се поставят изследваните лампи; фотоприемник (фотодиод или фоторезистор), разположен от вътрешната страна на фотометъра; цифров осцилоскоп за визуализиране и отчитане.



Фиг. 19.10. Лабораторна постановка за измерване на пулсации на светлинния поток

В табл. 19.2 са показани стойности на коефициента на пулсации на светлинния поток на някои лампи и схеми на включване.

Табл. 19.2. Коефициент на пулсации на светлинния поток k_n на някои лампи, %

Вид на лампата		Начин на включване		
		една фаза	две фази	три фази
Нажежаема лампа	40 W	13	-	-
	100 W	5,8	-	-
Нажежаема халогенна лампа		1	-	-
Луминесцентна лампа	бяла светлина	25	10	3
	дневна	40	17	5
Живачна лампа с коригиран спектър		65	31	7
Живачна лампа без луминофор		80 ÷ 100	-	-
Ксенонова лампа		130	60	5
LED лампа без изглаждащ кондензатор		> 70	-	-
LED лампа с изглаждащ кондензатор		2 ÷ 10	-	-

19.4. Фотобиологична безопасност на лампи и осветители

Въздействието на светлината и осветлението върху човешкото тяло все още често се подценява. Светлината е жизненоважна за много физиологични и психологически процеси. Провеждат се редица изследвания на биологичното въздействие върху човешкия организъм, от които се установява, че има пряка връзка между дневната светлина и чувството за комфорт. Дневната светлина има положителен ефект върху човешкия организъм и е отговорна за важни биологични процеси. Липсата на дневна светлина често се свързва с проблеми със съня.

Биологичният ритъм (циркаден ритъм) се контролира от интензитета на светлината и нейния спектрален състав – особено на синята компонента на светлината. Без дневна светлина производството на мелатонин и кортизол, хормоните – които основно регулират циркадния ритъм – се нарушава. Активността на човек е пряко свързана с количеството мелатонин в обращение. Ако нивото е високо, човек да се чувства уморени. Високото ниво на кортизол, от друга страна, осигурява активност и продуктивност. Производството на мелатонин и кортизол се контролира директно от количеството светлина, падащо върху ретината, независимо от визуалния процес. Голяма наситеност на пространството със светлина, особено в късовълновия спектрален диапазон (синя светлина), води до повишаване на нивото на кортизол и потиска производството на мелатонин. Ето защо човек се събужда когато е светло, и се чувства уморен, когато се стъмни [94].

Цветната температура на светлината и осветеността имат важни функции при проектирането на биологично въздействащо осветление на закрито. Съдържанието на синя (късовълнова) светлина с цветна температура над 5 300 K увеличава значително активността на човек през деня. Новите флуоресцентни и LED лампи могат да разширят обхвата на късите вълни до 12 000 K. Вечер, обратно, трябва да се използват лампи с топло бяла светлина с цветна температура под 3300 K и значително по-ниско ниво на осветеност, за да се подготви тялото постепенно за сън.

Освен въздействието върху циркадния ритъм, светлината има пряко въздействие и върху очите и тялото на човека и в някои случаи може да бъде опасна за тях. Разпознаването опасностите е от голямо значение за правилния избор на типа светлинен източник и неговия режим на работа в дадена осветителна уредба. Международният стандарт, приет и у нас, IEC 62471-7:2023 – „Фотобиологична безопасност на лампи и системи от лампи“ – определя по нов начин оценяването на фотобиологичната безопасност на лампи и осветители при нормална употреба.

Разглеждат се шест вида опасности (отрицателни въздействия) на ултравиолетовата (UV), видимата и инфрачервената (IR) светлина за очите и кожата при продължителност на въздействие до осем часа – табл. 19.3.

В зависимост от потенциалните фотобиологични рискове и въз основа на допустимото време на въздействие, светлинните източници се класифицират в четири групи, дадени в табл. 19.4.

Табл. 19.3. Вид на опасностите на светлината, посочени в IEC 62471

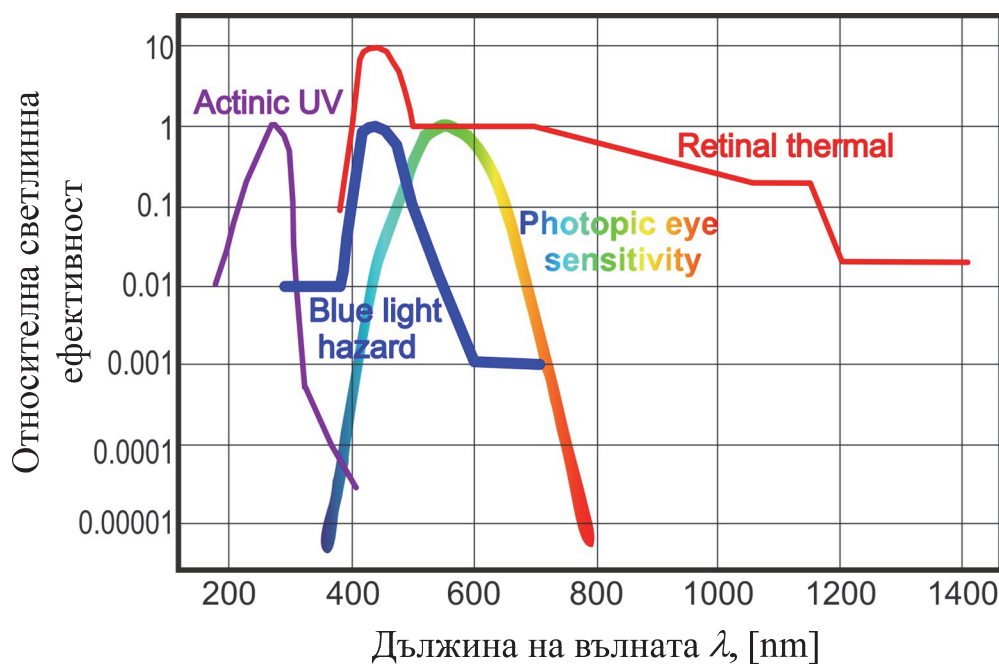
Опасност (вид на отрицателното въздействие)	Обхват на дължина на вълната, [nm]	Фотобиологично въздействие	
		Кожа	Очи
Actinic UV (предизвиква фотохимични реакции)	200 ÷ 400	Еритема; Еластоза	Фотокератит на роговицата; Катаракта на лещата
UV излъчване, близко до видимия спектър (UV-A)	315 ÷ 400	-	Катаракта на лещата
Retinal Blue Light (увреждане на ретината със синя светлина)	300 ÷ 700	-	Фотокератит на ретината
Retinal Thermal (топлинно въздействие на ретината)	380 ÷ 1 400	-	Изгаряне на ретината
IR излъчване	780 ÷ 3 000	-	Изгаряне на роговицата; Катаракта на лещата
Топлинно излъчване	380 ÷ 3 000	Изгаряне на кожата	-

Табл. 19.4. Рискови групи на светлинни източници, посочени в IEC 62471, в зависимост от фотобиологичната опасност

Рискова група	Описание
Без риск (Exempt)	Няма фотобиологична опасност
RG1	Няма фотобиологична опасност при нормални ограничения на обкръжението
RG2	Не представлява опасност от негативна реакция към ярка светлина или топлинен дискомфорт
RG3	Опасност дори при моментно излагане на светлина

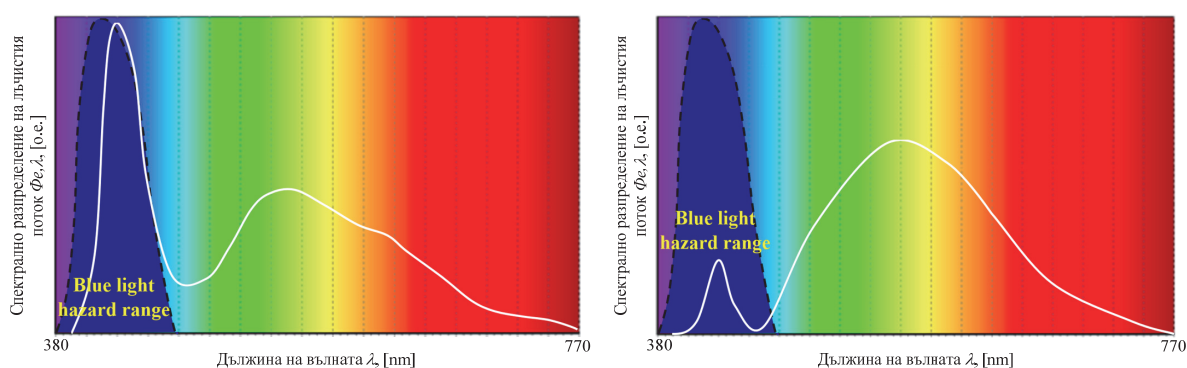
Има четири тегловни функции, използвани в IEC 62471 – три, свързани със специфични фотобиологични опасности, и четвърта, фотопична реакция на очите, използвана при оценката на светлинната ефективност (светлоотдаването) на определен светлинен източник – фиг. 19.11.

Трите функции – **Actinic UV**, **Blue light hazard** (опасна синя светлина) и **Retina thermal**, са свързани със специфични фотобиологични опасности. Четвърта функция – Photopic eye sensitivity, представлява фотопична реакция на очите, използвана при оценката на светлинната ефективност (светлоотдаването) на определен светлинен източник – фиг. 19.11. Светлинният източник трябва да се оценява при осигурявана от него осветеност 500 lx.



Фиг. 19.11. Функции *Actinic UV*, *Blue light hazard*, *Retina thermal* и *Photopic eye sensitivity*, използвани в IEC 62471

В почти всички съвременни светлинни източници наличието на по-голяма интензивност на излъчване в опасния диапазон на синята светлина се характеризира с по-висока цветна температура. Анализът на спектралните разпределения на излъчването на най-широко използваната LED технология от вида син LED + жълт фосфор с различна корелирана цветна температура T_{cp} показва, че светодиодите със студено бяла светлина имат значително по-високи емисии в диапазона на опасната синя светлина в сравнение с тези с топло бяла светлина (фиг. 19.12).



а) LED осветител с $T_{cp} = 6\,500\text{ K}$

б) LED осветител $T_{cp} = 2\,700\text{ K}$

Фиг. 19.12. Спектрални разпределения на LED осветители със студено бяла и топло бяла светлина с различни емисии на опасна синя светлина

Може да се направи препоръка за най-разпространената в днешно време технология от вида **син LED + жълт фосфор**: за да се намали опасността от синя светлина на вътрешното осветление в помещения с непре-

късното присъствие на хора, трябва да се използват LED лампи и осветители с корелирана цветна температура $T_{cp} \leq 4\,500\text{ K}$ [94].

19.5. Извеждане от употреба на разрядни лампи с живак и луминофори

Съществен недостатък на луминесцентните, компактните луминесцентни и индукционни лампи е съдържанието на живак, който е силно токсичен и канцерогенен. Ако разрядната тръба на лампата бъде счупена или разхерметизирана и живакът изпуснат в помещение или околната среда с хора, той се изпарява при нормална околна температура и може да бъде вдишан или да попадне върху тялото и дрехите на хора.

По-модерните и ефективни разрядни лампи използват в луминофорите си фосфор, който е химически агресивен към органични химически съединения и при евентуално попадане в отворени рани на човешкото тяло може да предизвика тежки инфекции.

Поради описаните по-горе опасности, излезлите от употреба разрядни лампи не трябва да се чупят и изхвърлят с обикновените отпадъци, а да се връщат в търговските обекти, от които са закупени или изхвърлят на места за опасни отпадъци, за да се осигури тяхното безопасно за хората утилизирание. Тези, както и други детайли, са заложи в „Наредба за изискванията за пускане на пазара на луминесцентни и други лампи, съдържащи живак, и за третиране и транспортиране на излезли от употреба луминесцентни и други лампи, съдържащи живак“, в сила от 01.01.2001 г.

При евентуално счупване на разрядната тръба и изтичане на живака, трябва капчиците живак бързо да се отстранят или абсорбират с прахообразна сяра, а стъклата да се изхвърлят внимателно с ръкавици за да се избегне попадането на живак или фосфор по кожата на хора или домашни любимци. Площадките за временно съхранение на луминесцентни лампи трябва да са оборудвани със специален съд за събиране на счупените разрядни лампи и да разполагат с 2 грама сяра за всеки килограм лампи.

20. ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ИНСТАЛАЦИИ НА ОСВЕТИТЕЛНИ УРЕДБИ

Съществена част от обучението по учебната дисциплина „Осветителна и инсталационна техника“ е разработката на курсова работа за проектиране на осветителна и електрическа инсталация в сграда, методологията за която е детайлно описана теоретично и с примери в отделно учебно пособие – „Ръководство за курсова работа по Осветителна и инсталационна техника“. Методологията включва: аналитични светлотехнически изчисления на количествени и качествени показатели за едно помещение; автоматизирани светлотехнически изчисления на всички помещения със специализиран софтуерен продукт; проектиране на осветителна и силова

инсталация на етаж от сградата, което се състои в определяне на местоположението и броя на разпределителните табла, групиране на осветителните и контактните излази по токови кръгове, определяне на електрическите товари на токовите кръгове за осветление и контакти и на разпределителните табла, избор на защитна апаратура, избор на сечение на проводници и кабели; графична част с инсталационен план на осветителната уредба и еднолинейна схема на разпределителното табло, от която в настоящата тема са представени съкратено най-важните етапи, свързани с електрическата част на осветителната инсталация.

20.1. Определяне на броя, местоположението и мощността на осветителите, ключовете за осветление и контактите в помещенията

Съществен етап в проектирането на осветителни и силови инсталации в сгради е определянето на броя, местоположението и мощността на излазите за осветители и контакти.

При проектиране на осветителната инсталация броят, местоположението, начина на групиране по реда на включване и изключване, мощността и типът на осветителите и светлинните източници в тях се определят от извършените за всяко помещение автоматизирани светлотехнически изчисления със специализиран софтуер, като се спазват изискванията на Наредба 3 и БДС EN 12464-1:2021 [8,31]. Броят на осветителите зависи от нормативните изисквания в зависимост от функционалното предназначение на помещението и площта на работното пространство, вида на светлоразпределението и светлинния добив на осветителите. Местоположението на осветителите се определя от геометричната конфигурация на помещението и работното пространство и от системата на осветление.

20.2. Групиране на осветителни и контактни излази по токови кръгове

Електрическата връзка между разпределителните табла и потребителите (излазите за осветители и контакти и изводите за по-мощни консуматори) се осъществява посредством токови кръгове.

Групирането на излазите за осветление, обикновени, усиленни контакти и по-мощни консуматори на електрическа енергия се извършва съгласно изискванията и препоръките на Наредба 3 [31,40].

Излазите за осветление и излазите за контакти се свързват поотделно към разпределителното табло чрез токови кръгове по магистрална схема с едностранно електрозахранване [31,40].

20.3. Определяне на електрическите товари на токовите кръгове за осветление

При оразмеряване на елементите на електрическата инсталация се използва метода на максималния продължителен товар. Максималните продължителни активни товари (мощности) на токовите кръгове се прие-

мат за равни на инсталираните мощности на свързаните към съответните токови кръгове за осветление ($P_m = P_{io}$) и с излази за контакти ($P_m = P_{ик}$) [39,40].

Инсталираната активна мощност на токов кръг за осветление се определя с израза:

$$P_{io} = \sum_{i=1}^{n_o} k_{ПРА} n p_{ли}, \quad (20.1)$$

където: $p_{ли}$ – активна мощност на една лампа в осветителя във всеки един излаз на токовия кръг, [W]; $k_{ПРА}$ – коефициент, отчитащ загубите в пуско-регулируеща апаратура на осветителите (табл. 20.1); n_o – брой на осветителите, свързани към токовия кръг; n – брой на лампите в един осветител.

Табл. 20.1. Стойности на $k_{ПРА}$ в зависимост от вида на пуско-регулирущата апаратура, типа и мощността на лампите

Вид на ПРА	Вид и мощност [W] на лампите в осветителя					
	LED (ако е външна)	ЛЛ			НЛВН и МХЛ	
		9 ÷ 21	24 ÷ 32	36 ÷ 65	50 ÷ 100	≥ 250
Електромагнитна	-	1,4	1,25 ÷ 1,3	1,2	1,2	1,1
Електронна	1,05 ÷ 1,15	1,07	1,05	1,05	-	-

20.4. Избор на защитна апаратура на токови кръгове

Защитата на елементите на електрическата инсталация (кабели, проводници, комутационна апаратура) се осъществява с автоматични прекъсвачи или с предпазители със стопяема вложка:

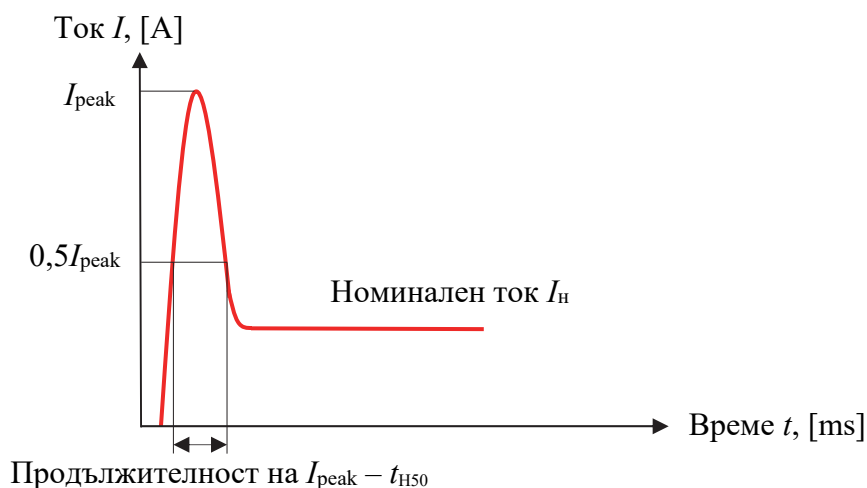
- срещу претоварване;
- срещу токове на късо съединение.

Изборът на защитна апаратура започва от линиите на токовите кръгове и завършва с линиите, захранващи разпределителните табла, след определяне на максималния продължителен ток I_m , който за еднофазен токов кръг се определя с израза:

$$I_m = \frac{P_m}{U_{\phi} \cos \varphi}, \quad (20.2)$$

където: U_{ϕ} – номинална стойност на фазното напрежение ($U_{\phi} = 230$ V); $\cos \varphi$ – средна стойност на фактора на мощността: за осветителен товар се приема $\cos \varphi = 0,9$, т.е. с корекция на фактора на мощността на осветители с луминесцентни и LED лампи; за силов товар – $\cos \varphi$ зависи от характера и режима на работа на консуматорите.

При избор на автоматични прекъсвачи за защита на токови кръгове с LED осветители трябва да се отчита не само максималния продължителен ток I_M , но и пусковия ток I_n , при което условието за избор $I_M \leq I_n$ не винаги е достатъчно. Пусковият ток в LED осветителите се причинява от зареждане на кондензаторите в повечето електронни пусково регулиращи апаратури (ЕПРА), наричани драйвери. Величините пиков пусков ток I_{peak} (в някои литературни източници се нарича върхов импулсен ток) и продължителност на пиковия пусков ток t_{H50} (фиг. 20.1) са основни параметри при определянето на пусковия ток и трябва да се отчитат при избора на автоматични прекъсвачи, за да се избегнат нежелани изключения [40]. Големината и продължителността на пусковия ток зависят от стойността на напрежението (момента на включване), температурата, характеристиките и броя на драйверите в (или свързани извън) LED осветителите.



Фиг. 20.1. Параметри на пусков ток на драйвер с LED осветител

20.5. Избор на сечение на проводници и кабели

Сечението на проводници и кабели за осветителна инсталация се избира основно по допустимо нагряване, съгласуване на сечението със защитния апарат и допустима загуба на напрежение.

20.5.1. Определяне на сечението на проводници и кабели за ниско напрежение по допустимо нагряване при нормален режим

Допустимият ток на проводника или кабела трябва да бъде по-голям от максималния продължителен ток. Сечението на проводници и кабели по допустимо нагряване при нормален режим се определя по условието:

$$I_{доп} \geq \frac{I_M}{k_1 k_2}, \quad (20.3)$$

където: $I_{доп}$ – допустим ток на проводника или кабела, [A]; I_M – максимален продължителен ток, [A], определен по формула (20.2); k_1 – корекционен

коэффициент на допустимия ток на проводника или кабела в зависимост от броя на едновременно положените проводници в сноп; k_2 – корекционен коэффициент на допустимия ток в зависимост от околната температура, който се определя от допустимата температура на жилото на проводника θ , [°C], действителната температура на околната среда $\theta_{\text{ок}}$ (въздух: 25 °C и земя: 20 °C) и околната температура, при която е измерен допустимият ток на проводника или кабела $\theta_{\text{ок, доп}}$, [°C]: $k_2 = \sqrt{\frac{\theta - \theta_{\text{ок}}}{\theta - \theta_{\text{ок, доп}}}}$ [8,13].

Корекционните коефициенти k_1 и k_2 във формула (20.3) не се въвеждат, когато начина на полагане на проводниците е еднослойно (едноредово) и температурата на околната среда е под 25 °C [39].

Когато начинът на полагане на проводниците е многослоен или на снопове, k_1 се определя от броя на тези проводници [39]: до 4 броя – $k_1 = 1$; до 5 ÷ 6 броя – $k_1 = 0,85$; до 7 ÷ 9 броя – $k_1 = 0,75$; до 10 ÷ 11 броя – $k_1 = 0,70$; до 12 ÷ 14 броя – $k_1 = 0,65$; до 15 ÷ 18 броя – $k_1 = 0,60$.

20.5.2. Съгласуване на сечението със защитния апарат

Допустимият ток на проводника или кабела трябва да бъде по-голям от тока на защитния апарат. Важно е да се извърши съгласуване на сечението на проводника или кабела със защитния апарат (предпазител или автоматичен прекъсвач), тъй като често се избират защиты с по-големи номинални токове, поради изискването за селективност и др. Допустимият ток на проводника или кабела $I_{\text{доп}}$ и токът на защитния апарат I_3 трябва да изпълняват следното условие:

$$I_{\text{доп}} \geq I_3 \frac{k_3}{k_1 k_2}, \quad (20.4)$$

където k_3 – корекционен коефициент (минимална кратност между $I_{\text{доп}}$ и I_3), отчитащ типа на защитния апарат и необходимото ниво на защита от претоварване, като за автоматични прекъсвачи е единица.

В зависимост от вида на защитния апарат, стойността на тока I_3 е:

- за предпазител – номиналната стойност на тока на вложката;
- за автоматичен прекъсвач – тока на термичния изключвател или тока на настройка на топлинния изключвател, ако прекъсвачът е с регулируем защитен блок.

20.5.3. Проверка на сечението на проводниците по допустима загуба на напрежение

Загубата на напрежение представлява алгебричната разлика на напреженията в началото и в края на разглежданата част от електрическата мрежа. Действителната загуба на напрежение ΔU за разглежданата мрежа трябва да бъде по-малка от максимално допустимата според Наредба 3/2004 г.: $\Delta U \leq \Delta U_{\text{доп}}$.

За вътрешни електрически инсталации за битови и обществени (административни, учебни и др.) сгради индуктивното съпротивление на проводниците или кабелите може да се пренебрегне и загубата на напрежение ΔU се определя по следния опростен израз:

$$\Delta U = \sum_{i=1}^n K_i \frac{P_{m,i} l_i}{C_i S_i} \leq U_{\text{доп}} [\%], \quad (20.5)$$

където: $P_{m,i}$ – максимална продължителна мощност в i -тия участък на линията, [kW]; l_i – дължина на i -тия участък на линията, [m]; n – брой на участъците с различна максимална продължителна мощност, сечение или брой на проводниците; K_i – корекционен коефициент, отчитащ реактивната съставка на загубата на напрежение и е реципрочен на фактора на мощността – $K=1/\cos \varphi$; S_i – сечение на проводника в i -тия участък на линията, [mm²]; C_i – коефициент, който зависи от материала на проводника, броя на проводниците, напрежението и околната температура, [kW.m/mm²] – табл. 20.2 [39].

Таблица 20.2. Стойности на коефициента C , [kW.m/mm²]

Материал	Околна температура 20 °C		Околна температура 30 °C	
	Номинално напрежение		Номинално напрежение	
	230 V	400 V	230 V	400 V
Мед	14,5	87	14	84
Алуминий	8,8	53	8,5	51

От формула (20.5) се вижда, че ΔU зависи от максималната продължителна мощност, дължината и сечението на проводника или кабела. За осветителна и силова инсталация ΔU се изчислява:

- за токов кръг с най-голяма максимална продължителна мощност;
- за токов кръг с най-голяма дължина.

Действителната загуба на напрежение от крайното разпределително табло до най-отдалечения излаз на токовия кръг трябва да бъде $\Delta U \leq 2,5 \%$. Ако условието от израз (20.5) не е спазено, трябва да се увеличи минимално заложеното сечение на токовия кръг или да се разпредели максималния продължителен товар на други токови кръгове.

Неутралните проводници в електрически мрежи за осветителни уредби се оразмеряват според тока на най-натоварената фаза [39].

ЛИТЕРАТУРА

1. Айзенберг, Ю., Генералное направление развития осветительной техники для общественных зданий - люминесцентные лампы типа T5 с электронными ПРА, сп. Светотехника, № 5, 2003.
2. Айзенберг, Ю., Справочная книга по светотехнике, Москва "Энергоатомиздат", 1983.
3. Александров, Н. Фундаментална теория на цветовете. "Изток-Запад", София, 2012, ISBN 978-619-152-110-4.
4. Андрейчин, Е., К. Богатев и колектив. Наръчник по осветителна техника - том I и II, Техника, 1977.
5. Анчев, М., З. Иванов, Електронен пускорегулиращ апарат за луминесцентни лампи с висок фактор на мощност, списание "Осветителни системи", бр. 3, АВС Тех-ника, София, 2001.
6. Афанасьева, Е., В. Скобелев. Источники света и пускорегулирующая аппаратура. Моства, Энергоатомиздат, 1986.
7. БДС EN 12193:2019 - Светлина и осветление. Осветление на спортни съоръжения.
8. БДС EN 12464-1:2021 - Светлина и осветление. Осветление на работни места. Част 1: Работни места на закрито.
9. БДС EN 12464-2:2014 - Светлина и осветление. Осветление на работни места. Част 2: Работни места на открито.
10. БДС EN 12665:2018 - Светлина и осветление. Основни термини и критерии за определяне на изисквания за осветлението.
11. БДС EN 13032-4:2015+A1:2019 - Светлина и осветление. Измерване и представяне на фотометрични данни на лампи и осветители. Част 4: Светодиодни лампи, модули и осветители.
12. БДС EN 13201-3:2016 - Улично осветление. Част 3: Изчисляване на светлотехническите показатели.
13. БДС EN 60155:1995/A2:2007 - Стартери с тлеещ разряд за луминесцентни лампи (IEC 60155:1993/A2:2006).
14. БДС EN 60927:2007/A1:2013 - Спомагателни устройства за лампи. Пускови устройства (различни от стартери с тлеещ разряд). Изисквания към работните характеристики (IEC 60927:2007/A1:2013).
15. БДС EN 61347-1:2015 - Устройства за управление на лампи. Част 1: Общи изисквания и изисквания за безопасност (IEC 61347-1:2015).
16. БДС EN IEC 60598-1:2021 - Осветители. Част 1: Общи изисквания и изпитвания (IEC 60598-1:2020).
17. БДС EN ISO 11664-5:2017 - Колориметрия. Част 5: Графична цвetoва система CIE 1976 L*u*v*. Цветно пространство и u', v' графична скала на еднообразно хроматиране (ISO/CIE 11664-5:2016).
18. БДС EN ISO/CIE 11664-2:2023 - Колориметрия. Част 2: Стандартни светлинни източници по CIE (ISO/CIE 11664-2:2022).
19. Василев, Н. Промислено осветление. София, Техника, 1973.
20. Василев, Х., Д. Деянов. Осветление на съвременното жилище. Denima, София, 1994. ISBN: 9547994093.
21. Ганев, Х., Промислено осветление, ВТУ "Ангел Кънчев" - Русе, 1986.
22. Ганчев, Г. Книга за осветлението. ИК "Св. Иван Рилски", София, 2018. ISBN 978-954-353-367-1.
23. Гуротов, М.. Основы светотехники и источники света. Москва, Энергоатомиздат, 1983.

24. Делегиран регламент (ЕС) 2019/2015 на Комисията от 11.03.2019 г. за допълнение на Регламент (ЕС) 2017/1369 на Европейския парламент и на Съвета по отношение на енергийното етикетироване на светлинни източници (в сила от 01.09.2021 г.).
25. Диканаров, Г., Д. Деянов. Проектиране на осветителна и инсталационна техника. София, АВС Техника, ISBN: 954-8873-50.
26. Ибришимов, Х. Ръководство за курсова работа по електронни устройства в електроенергетиката. УИ "Васил Априлов", Габрово, 2020, ISBN: 978-954-683-625-0.
27. Иванов, З. Осветителна и инсталационна техника, София, Авангард Прима, 2010, ISBN: 978-954-323-779-1.
28. Иванов, З. Пускорегулиращи апарати за източници на светлина. София, Авангард Прима, 2017, ISBN: 978-619-160-837-9.
29. Иванов, З. Пускорегулиращи апарати за разрядни лампи. София, ТУ-София, 2003, ISBN: 954-998-347.
30. Лазарев, Д. Н. Сила света. Физическая энциклопедия, том 4, Москва, Большая Российская энциклопедия, 1994. ISBN 5-85270-087-8.
31. Наредба № 3 от 9 юни 2004 г. за устройството на електрическите уредби и електропроводните линии.
32. Пачаманов, А., Д. Павлов, Възможности за повишаване на енергийната ефективност на външно осветление на база проектиране по мезопична яркост, IV Научна конференция "ЕФ 2012", Дни на науката в ТУ-София, Созопол, 2012.
33. Платиканов С., П. Цанков, Енергийно ефективна замяна с натриеви лампи с високо налягане в уличното осветление в Община Монтана, Международна научна конференция Унитех '09, 20-21 ноември 2009, Vol. I, стр. 75-79.
34. Платиканов С., П. Цанков, И. Станчев, Пускови характеристики на газоразрядни лампи с високо налягане, XI национална конференция по осветление с международно участие "Осветление - 2001", 13-15 юни 2001, МДУ "Ф. Ж. Кюри", Варна.
35. Платиканов С., П. Цанков, Осветление на представителни площадни пространства, Международна научна конференция УниТех'01, 22-23 ноември 2001.
36. Публикации на Международния комитет по осветление: Дивизия 1 - "Зрение и цвят", 2014-2017, Доклад на Ива Петринска, Национален комитет по осветление (НКО).
37. Редактори на Уикипедия (2024). Роговица. Уикипедия, Свободната енциклопедия. Достъп на 10 юни 2024.
38. Рохлин, Г. Газоразрядные источники света. Москва, Энергоатомиздат, 1991. ISBN: 5-283-00548-8.
39. Цанков, П. Електроснабдяване. УИ "Васил Априлов", Габрово, 2014, ISBN: 978-954-683-514-7.
40. Цанков, П., М. Йовчев. Ръководство за курсова работа по осветителна и инсталационна техника. Университетско издателство "Васил Априлов", Габрово, 2022, ISBN 978-954-683-666-3.
41. Цанков, П., С. Платиканов. Ръководство за лабораторни упражнения по осветителна и инсталационна техника. Габрово, УИ "Васил Априлов", 2013. ISBN 978-954-683-506-2.
42. ANSI C78.377-2017 - Electric Lamps - Specifications for the Chromaticity of Solid-State Lighting Products.
43. ANSI/IES TM-30-20 - IES Method for Evaluating Light Source Color Rendition.
44. Bardsley, J. N.: International OLED Technology Roadmap, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 10 (1): 3-4 (2004)
45. Bommel, W. Interior Lighting - Fundamentals, Technology and Application. Springer, 2019, ISBN 978-3-030-17195-7.

46. Burroughes, J. H., Bradley, D. C., Brown, A. R., Marks, R. N., MacKay, K., Friend, R. H., Burns, P. L., Holmes, A. B.: Light-emitting diodes based on conjugated polymers, *Nature* 347 (6293): 539-541 (1990)
47. CIE 013.3-1995 - Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources.
48. CIE 015:2018 - Colorimetry, 4th Edition.
49. CIE 121-1996 - The Photometry and Goniophotometry of Luminaires.
50. CIE 140-2000 - Road lighting calculations.
51. CIE S 017:2020 - International Lighting Vocabulary (ILV), 2nd edition, ILV 17-31-146: luminance coefficient in diffuse illumination.
52. CIE S 017:2020 ILV, 2nd edition, ILV 17-21-003: visible radiation.
53. CIE S 017:2020 ILV, 2nd edition, ILV 17-21-029: spectral distribution.
54. CIE S 017:2020 ILV, 2nd edition, ILV 17-21-035: spectral luminous efficiency.
55. CIE S 017:2020 ILV, 2nd edition, ILV 17-21-038: radiant flux.
56. CIE S 017:2020 ILV, 2nd edition, ILV 17-21-039: luminous flux.
57. CIE S 017:2020 ILV, 2nd edition, ILV 17-21-040: photon flux.
58. CIE S 017:2020 ILV, 2nd edition, ILV 17-21-063: cylindrical illuminance.
59. CIE S 017:2020 ILV, 2nd edition, ILV 17-21-064: semi-cylindrical illuminance.
60. CIE S 017:2020 ILV, 2nd edition, ILV 17-21-092: maximum luminous efficacy.
61. CIE S 017:2020 ILV, 2nd edition, ILV 17-22-016: photopic vision.
62. CIE S 017:2020 ILV, 2nd edition, ILV 17-22-017: scotopic vision.
63. CIE S 017:2020 ILV, 2nd edition, ILV 17-22-085: visibility level.
64. CIE S 017:2020 ILV, 2nd edition, ILV 17-23-068 correlated colour temperature (CCT).
65. CIE S 017:2020 ILV, 2nd edition, ILV 17-23-073: CIE 1976 uniform-chromaticity-scale diagram/CIE 1976 UCS diagram.
66. CIE x005-1992 - Proceedings of the CIE Seminar '92 on computer programs for light and lighting.
67. Colvin, V. L., Schlamp, M. C., Alivisatos, A. P.: Light-emitting diodes made from cadmium selenide nanocrystals and a semiconducting polymer, *Nature*, 370 (6488): 354-357 (1994)
68. Dumont, E., J.-L. Paumier, Are Standard Tables R Still Representative of the Properties of Road Surfaces in France?, *ResearchGate*, 2008.
69. Durmus, A., Correlated Color Temperature: Use and Limitations, *Lighting Research and Technology*, USA, 2021. doi: 10.1177/14771535211034330.
70. Erdem, T., H. Demir., Color Science of Nanocrystal Quantum Dots for Lighting and Displays, *Nanophotonics'2013*, De Gruyter, 2013. doi: 10.1515/nanoph-2012-003.
71. Gall, D. Grundlagen der Lichttechnik - Kompendium. Licht und Beleuchtung, Ilmenau, Germany, 2004. ISBN: 3-7905-0923-X.
72. IEC 60050-845:2020 - International Electrotechnical Vocabulary (IEV) - Part 845: Lighting.
73. INDALUX - Lighting Engineering Handbook, 2002.
74. ISO 11664-2/CIE S 014-2 - Colorimetry - Part 2: CIE Standard Illuminants for Colorimetry.
75. Kho, Mu-Jeong, Javed, T., Mark, R., Maier, E., David, C: OLED Solid State Lighting, Kodak European Research, Cambridge Science Park, Cambridge, UK (2008)
76. Kostic, M. Vodic kroz svet tehnike osvetljenja. Minel - Schreder, Beograd, 2000, ISBN: 978-86-902101-1-3.
77. Lighting Handbook - Illuminating Engineering Society of North America (IESNA), Ninth edition, 2000, ISBN: 0-87995-150-8.

78. MacAdam, D. Lewis. Visual Sensitivities to Color Differences in Daylight (Abstract). *Journal of the Optical Society of America (JOSA)*, 1942. doi:10.1364/JOSA.32.000247.
79. Neidhardt, H., Wilhelm, L., Zagrebnov, V. A.: A New Model for Quantum Dot Light Emitting-Absorbing Devices: Proofs and Supplements, *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 6 (1): 6-45 (2015)
80. Qasim Khan, Sayed Ali Khan, Qiaoliang Bao, Chapter 7 - Light-emitting devices, Editor(s): Qiaoliang Bao, Hui Ying Hoh, In *Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, 2D Materials for Photonic and Optoelectronic Applications*, Woodhead Publishing, 2020, Pages 175-197, ISBN 9780081026373
81. Ravi, S., C. S. Vasan, Implementation of a Tunable RGB LED Light Source, *International Journal of Circuit Theory and Applications (IJCTA)*, John Wiley & Sons, 2015, pp. 1251-1260.
82. Royer, M., R. Tuttle, S. Rosenfeld, N. Miller, Color Maintenance of LEDs in Laboratory and Field Applications, *Pacific Northwest National Laboratory (PNNL)*, U.S. Department Energy, USA, 2013.
83. Ryer, A. D. *The Light Measurement Handbook*. International Light Technologies, 1997. ISBN 0-9658356-9-3.
84. Simons, R. H., A. R. Bean. *Lighting Engineering - Applied calculations*. Architectural Press, UK, Reed Educational and Professional Publishing, 2001, ISBN: 0750650516.
85. Sturm, C., E. Klein, *Betriebsgereute und Schaltungen fuer elektrische Lampen*, Muenchen, Siemens Aktiengesellschaft, 1992.
86. Tabaka, P., & Wtorkiewicz, J. (2021). Analysis of the Spectral Sensitivity of Luxmeters and Light Sensors of Smartphones in Terms of Their Influence on the Results of Illuminance Measurements-Example Cases. *Energies*, 15(16), 5847
87. Taylor, A. E. F. *Illumination Fundamentals*. Optical Research Associates, Rensselaer Polytechnic Institute, 2000.
88. The International Bureau of Weights and Measures (BIPM) - The International System of Units, SI Brochure, 9th edition, 2019.
89. The Rods and Cones of the Human Eye. *HyperPhysics Concepts* - Georgia State University.
90. TL-D 36W Snow White 1SL/25 (PHILIPS) - Datasheet, 2023.
91. Tsankov, P., V. Stefanova, M. Yovchev, I. Stoyanov, Measurement and Analysis of the Spectral Emission of Different Types of Domestic Lamps in the Blue Light Hazard Wavelength Range, *Contemporary Materials*, XV-1 (2024), pp. 9-18, ISSN: 1986-8677.
92. Tsankov, P., Yovchev, M.: Study of the Electrical Characteristics of Light- Emit-ting Diode Luminaires at Amendment of the Supply Voltage. *Balkan Light* 2018, ISBN 978-1-5386-6730-9/18/\$31.00 ©2018 IEEE (2018)
93. Tsankov, P., Yovchev, M.: Thermal imaging of the process of heating up to the steady state mode of LED luminaires, *Proceedings of Unitech 2015*, TU of Gabrovo, pp. I 78-83, ISSN 1313-230X (2015) (in Bulgarian)
94. Tsankov, P.T. (2020). *Lighting Technologies*. In: Pavlovic T. (eds). *The Sun and Photovoltaic Technologies. Green Energy and Technology*. Springer, Cham, pp 213-270. ISBN 978-3-030-22402-8.
95. V. Muzet et al., Review of Road Surface Photometry Methods and Devices - Proposal for New Measurement Geometries, *Lighting Research & Technology*, Vol. 53, Issue 3, 2021, pp. 213-229.
96. Wyszecki, G., Proposal for a New Color-Difference Formula, *Journal of the Optical Society of America (JOSA)*, 1963, pp. 1318-1319.
97. ZUMTOBEL - *The Lighting Handbook*, 2013.

98. Auer Signal: All about light intensity, luminous flux & illuminance - <https://www.auersignal.com/en/technical-information/visual-signalling-equipment/luminous-intensity/>
99. Black body.svg. (2024, January 3). Wikimedia Commons. Retrieved 11:45, July 21, 2024 from https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Black_body.svg&oldid=838235558.
100. Blackbody efficacy 1000-16000K.svg. (2023, November 26). Wikimedia Commons. Retrieved 14:04, July 22, 2024 from https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Blackbody_efficacy_1000-16000K.svg&oldid=825191286.
101. CIE CRI TCS SPDs.svg. (2024, January 18). Wikimedia Commons. Retrieved 08:01, July 19, 2024 from https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:CIE_CRI_TCS_SPDs.svg&oldid=843041042.
102. File: Cone-absorbance-en.svg. (2024, April 9). Wikimedia Commons. Retrieved 12:52, June 11, 2024 from <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Cone-absorbance-en.svg&oldid=867013067>.
103. File: Eye-diagram.svg. (2022, April 3). Wikimedia Commons. Retrieved 12:34, June 10, 2024 from <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Eye-diagram.svg&oldid=646403055>.
104. File: Luminosity.svg. (2023, April 17). Wikimedia Commons. Retrieved 08:33, June 13, 2024 from <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Luminosity.svg&oldid=751419897>.
105. Glow discharge current-voltage curve English.svg. (2022, September 18). Wikimedia Commons. Retrieved 07:29, July 23, 2024 from https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Glow_discharge_current-voltage_curve_English.svg&oldid=689609263.
106. Gluelebensdauer-ru.svg. (2023, November 11). Wikimedia Commons. Retrieved 17:45, July 24, 2024 from <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Gluelebensdauer-ru.svg&oldid=820705440>.
107. Hsl-hsv models.svg. (2023, August 28). Wikimedia Commons. Retrieved 12:18, July 11, 2024 from https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Hsl-hsv_models.svg&oldid=796574733.
108. <https://gene.vision/retina/>
109. <https://www.electrostart.com/products/conventional-lighting/36>.
110. <https://www.ltioptics.com/en/bsdf-material-library>
111. https://www.thorlabs.com/images/tabimages/LED4D_All_LED_Spectra.gif
112. Incandescent light bulb.svg. (2023, September 29). Wikimedia Commons. Retrieved 05:23, July 24, 2024 from https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Incandescent_light_bulb.svg&oldid=806072762.
113. Lichtausbeute von Allgebrauchsgl?hlampen-ru.svg. (2022, November 28). Wikimedia Commons. Retrieved 15:29, July 24, 2024 from https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Lichtausbeute_von_Allgebrauchsgl%C3%BChlampen-ru.svg&oldid=710668608.
114. Prism-rainbow-black.svg. (2020, October 31). Wikimedia Commons. Retrieved 07:45, July 11, 2024 from <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Prism-rainbow-black.svg&oldid=508538495>.
115. Stokes shift diagram.svg. (2023, January 7). Wikimedia Commons. Retrieved 11:50, July 23, 2024 from https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Stokes_shift_diagram.svg&oldid=723577099.