

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЦИРКАДИАЛНАТА ЕФЕКТИВНОСТ НА ОСВЕТЛЕНИЕТО В УЧЕБНА ЛАБОРАТОРИЯ

Ива Петринска*, Дилиан Иванов

Технически Университет - София, бул. „Кл. Охридски“ 8, София, България

*кореспондиращ автор: ipetrinska@tu-sofia.bg

INVESTIGATION OF THE CIRCADIAN EFFICIENCY OF LIGHTING IN AN EDUCATIONAL LABORATORY

Iva Petrinska*, Dilyan Ivanov

¹Technical University of Sofia, Kl. Ohridski 8 Blvd., Sofia, Bulgaria

*Corresponding author: ipetrinska@tu-sofia.bg

Abstract

The circadian efficiency of indoor lighting is a very important problem nowadays, interconnected with the fast transition from conventional to LED lighting. The paper presents an investigation of the influence of the light conditions on people estimated by means of equivalent melanopic lux (EML) for different possible scenarios for lighting in an educational laboratory: daylighting; daylighting plus artificial lighting with different correlated color temperature (CCT) and viewing directions, as well as only artificial lighting with different CCT and viewing directions at different positions of the viewers within the laboratory. To estimate the circadian efficiency of lighting in the scenarios considered radiometric measurements of the spectral power distribution of light are taken. The results confirm that daylight conditions are the best for entrainment of the human circadian rhythms, but artificial lighting can also contribute for such an effect.

Keywords: circadian efficiency of lighting; equivalent melanopic lux; integrated lighting.

ВЪВЕДЕНИЕ

Светлината играе основна роля в човешкия живот, не само защото е свързана с осъществяването на зрителния процес, но и поради невизуалното ѝ влияние върху цикличните процеси в организма и в частност на т.нар. циркадни ритми. С изобретяването и развитието на електрическите светлинни източници, все повече хора прекарват значително време на закрито и работят продължително в условия на изкуствено или интегрално осветление, или в случаите, когато има достатъчно налична естествена светлина, тя най-често навлиза в помещенията през странично разположени светлинни отвори, които често биват засенчвани, за да се ограничат преките слънчеви лъчи и прекомерното количество инфрачервено лъчение, особено през лятото. Човекът, обаче е еволюирал, изложен на естестве-

ната смяна на деня и нощта, което е довело до формирането на циркадните ритми и ендогенните цикли, които се влияят от ганглиевите фоторецептори, разположени в човешкото око и са отговорни за адекватно продължаващите периоди на будност и сън през денонощието т.е. имат пряко влияние върху човешкото здраве. В действителност един пълен циркаден цикличен процес в човешкото тяло отнема малко повече от едно денонощие (приблизително 24,3 часа), поради което синхронизацията им става с т.нар. „таймери“, основните от които са ганглиевите клетки (ipRGC). Светлината не влияе на тези клетки по същия начин, по който определя зрителния процес. Докато колбичките, отговорни за виждането през деня имат максимална чувствителност към средно дългите светлинни вълни, ганглиевите клетки, влияещи

циркадните ритми имат максимум на чувствителността в синята част на спектъра на светлината или към по-късовълновото лъчение. Поради тази причина и методите за оценка на визуалния процес и невизуалните такива са различни т.е. не може да се каже, че ако едно помещение е добре осветено т.е. за него са удовлетворени количествения и качествените показатели, предписани в БДС EN 12464-1 [1], то ще има и висока ефективност за естественото протичане на циркадните ритми на обитателите в него. В ганглиевите клетки се генерира фотопигмент, наречен меланопсин. За осъществяване на фототрансдукция, или напасване на продължителността на циркадните ритми, участие вземат и чувствителните към късите светлинни вълни колбички [2].

Като цяло факторите, които оказват влияние върху невизуалния ефект на светлината върху хората могат да бъдат класифицирани в три групи:

[1] Светлинни фактори:

- Спектър на светлината;
- Количество светлина;
- Пространствено разпределение на светлината (насоченост);
- Продължителност на светлинното влияние;
- История на светлинното влияние.

[2] Човешки фактори:

- Подтискане на секрецията на мелатонин;
- Обективна/субективна бодрост или бдителност;
- Реакция на ретината/генергиране на фототокови сигнали;
- Телесна температура;
- Пулс;
- Мелатонинов цикъл;
- Цикъл на промяна на телесната температура.

[3] Архитектурни особености на помещението:

- Големина на светлинните отвори;

- Географско изложение на светлинните отвори;
- Вид остъкление;
- Наличие на засенчващи устройства;
- Вътрешно оформление на помещението;
- Изглед навън.

Всички гореспоменати фактори оказват влияние върху невизуалните ефекти, които светлината оказва върху човека, но не всички съвкупно могат да бъдат оценени с единен показател [3].

ИЗЛОЖЕНИЕ

За оценка на невизуалното влияние на светлината съществуват различни методи, като три от тях са се наложили. Първият метод е предложената от международната комисия по осветление (CIE) в CIE S 026/E:2018 [4] претеглена спрямо чувствителността на всички фоторецептори в човешкото око (α -опична) облъченост E_e, α . Тази величина се определя по формула 1:

$$E_{e,\alpha} = \int E_{e,\lambda}(\lambda) S_{\alpha}(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

където E_e, α е α -опичната облъченост, $E_e, \lambda(\lambda)$ е спектралната облъченост, и $S_{\alpha}(\lambda)$ е α -опичния спектър, който оказва максимално влияние върху човешкото око.

На базата на α -опичната облъченост, са дефинирани и меланопично ефективните величини меланопична еквивалентна естествена осветеност mEDI (осветеността от стандартен източник D65, който има меланопична ефективност, равна на тази на изследвания светлинен източник за дадена осветеност, получена от него) и меланопично отношение на ефективността на дневната светлина mDER (отношението на осветеността от стандартен източник D65 (mEDI) и осветеността от изследвания източник E_v, lx , при равенство на абсолютната меланопична ефективност на двата източника).

$$mEDI = \frac{\int_{380}^{780} S_{mel}(\lambda) E_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda}{K_{mel,V}^{D65}} \quad (2)$$

Където $K_{mel,V}^{D65} = 1.3262 \text{ mW/lm}$, а $S_{mel}(\lambda)$ е кривата на спектралната чувствителност на ганглиевите клетки (ipRGC), $E_{e,\lambda}(\lambda)$ е спектрална облъченост, определена от формула 1.

Съответно:

$$mEDI = \frac{1}{K_{mel,V}^{D65}} \frac{\int_{380}^{780} S_{mel}(\lambda) E_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda}{E_V} \quad (3)$$

Вторият метод за оценка на невизуалното действие на светлината е циркадният стимул (CS) [5]

$$CS = 0.7 - \frac{0.7}{1 + \left(\frac{CL_A}{355.7}\right)^{1.1026}} \quad (4)$$

където CL_A е циркадно активната светлина, която зависи от спектралното разпределение на облъчеността, меланопсиновата чувствителност според коефициента на пропускане на лещата на окото; чувствителността на чувствителните към късовълново лъчение колбички, коефициента на пропускане на макуларния пигмент, кривите на чувствителност на окото при скотопично и фотопично зрение и определени константи [5].

Третият метод, който се използва и в настоящия доклад е посредством оценка на величината еквивалентна меланопична осветеност (EML – equivalent melanopic lux), характеризираща влиянието на светлината върху циркадните ритми, определено в меланопични лусове. При наличие на информация за спектралното разпределение на облъчеността от даден източник на светлина, тази величина се изчислява с помощта на уравнение 3:

$$EML = R \cdot E,$$

където $R = 1.218$ (Меланопична облъченост/фотопична облъченост), E е осветеност. Константата 1.218 се нарича още равноенергийна константа [6].

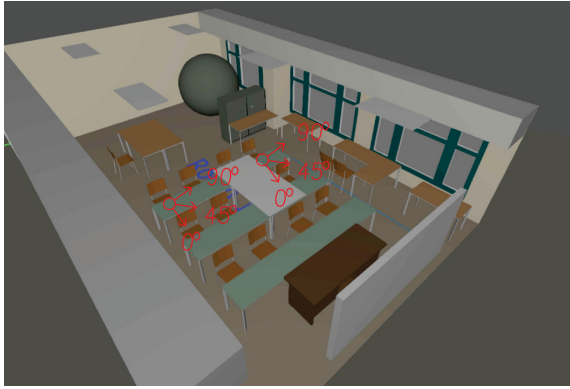
В настоящия доклад, за определяне на невизуалното влияние на светлината

върху човека са направени измервания на спектралното разпределение на облъчеността. За целта е използван радиометър Stellar BLACK-Comet, който има възможност за измерване на лъчения с дължина на вълната от 200 nm до 1100 nm. Експерименталните данни са заснети за учебна лаборатория по „Осветителна техника“, намираща се в Технически университет - София. Симулационен модел на помещението е даден на фиг. 1. Помещението е с дължина 7м, ширина 7м и височина 3м. Прозорците се състоят от 2 крила, всяко от които с дължина 3,2м и височина 2м, като започват от 0,8м от земята.



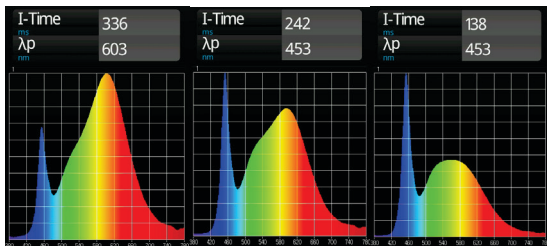
Фиг. 1. Симулационен модел на експерименталната зала

В тази зала осветителната уредба е биодинамична и позволява промяна на цветната температура от 2800K до 6500K. На фигура 2 са показани контролните точки, в които е извършено измерването на облъчеността и които са както следва: – за седнал наблюдател са измерени облъчености на височина 120см от пода на помещението при насочване на зрителната ос успоредно на прозорците или под условен ъгъл на навлюдение 0 градуса – наблюдателят гледа право напред; при посока на наблюдение на 45 градуса към прозореца и в случай на наблюдател, обърнат към прозореца, изли разположен на 90 градуса спрямо първоначалната му нулева позиция. Измерването е направено за наблюдател, седящ на последното работно място откъм вътрешната стена на помещението и за такъв, разположен на работното място, разположено най-близо до прозорците.



Фиг. 2. Контролни точки и посоки на наблюдение, за които е измерена облъченост

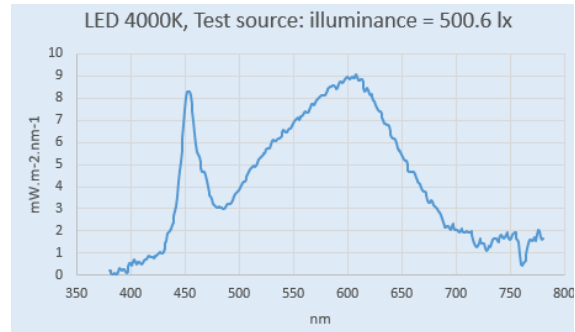
Направени са две серии от измервания на облъчеността от интегрално осветление – естествено и изкуствено, при промяна на цветната температура на осветителите в помещението съответно на 3000К, 4000К и 6500К фиг.3, при облачен ден – 04.10.2024г. и при ясен ден – 08.04.2024г с продължителност от 10ч. до 11ч. преди обяд.



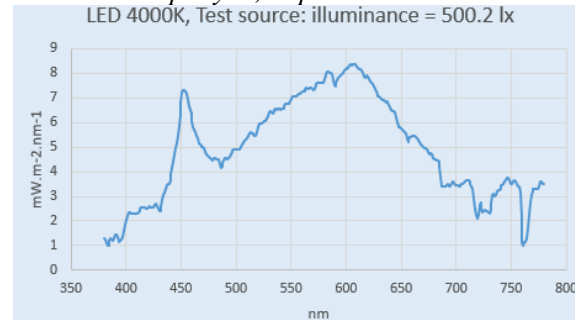
Фиг. 3. Спектрално разпределение на излъчването на осветителната уредба за цветни температури 3000К, 4000К и 6500К

Като показатели за оценка на невизуалното въздействие на светлината са използвани величините mEDI и $E_{e, \alpha}$.

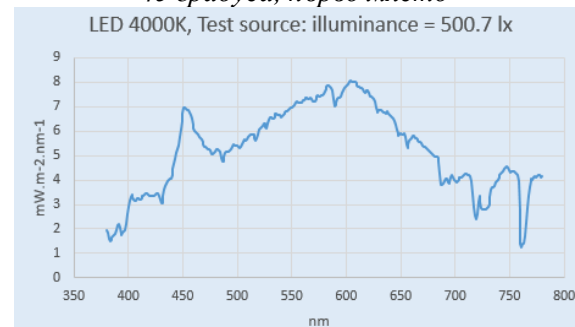
Резултантното спектрално разпределение на облъчеността за разгледаните посоки на наблюдение при ясен и мрачен ден за цветна температура 4000К са дадени на фиг. 4 до 6 За еднаквост на резултатите, всички спектри са дадени за условна осветеност от 500lx, която е минималната допустима осветеност за помещения от този тип според европейските норми и стандарти [1]. За нагледност на резултатите, последните са представени в табличен вид в таблици 1 - 8.



Фиг. 4. Спектрално разпределение при 0 градуса, първо място



Фиг. 5. Спектрално разпределение при 45 градуса, първо място



Фиг. 6. Спектрално разпределение при 90 градуса, първо място

Таблица 1. Данни за алфа опичното въздействие за първо място mDER, измерени на 4.10.24г.

	S-cone-opic	M-cone-opic	L-cone-opic	Rhodopic	Metanopic
3000K 0°	0,372	0,815	1,013	0,568	0,492
3000K 45°	0,534	0,868	1,008	0,689	0,633
3000K 90°	0,614	0,893	1,006	0,746	0,699
4000K 0°	0,521	0,862	1,004	0,662	0,598
4000K 45°	0,615	0,894	1,003	0,740	0,690
4000K 90°	0,672	0,911	1,003	0,782	0,740
6500K 0°	0,722	0,925	0,991	0,784	0,735
6500K 45°	0,725	0,929	0,996	0,809	0,768
6500K 90°	0,752	0,934	0,997	0,826	0,789

Таблица 2. Данни за алфа опичното въздействие приравнени към 500lx mEDI, за първо място измерени на 4.10.24г.

	S-cone-opic	M-cone-opic	L-cone-opic	Rhodopic	Melanopic
3000K 0°	187	410	509	286	248
3000K 45°	266	433	503	344	316
3000K 90°	306	445	502	372	349
4000K 0°	260	431	501	330	299
4000K 45°	310	450	505	372	347
4000K 90°	336	455	501	391	370
6500K 0°	359	460	493	390	365
6500K 45°	361	463	496	403	383
6500K 90°	377	468	500	414	395

Таблица 3. Данни за алфа опичното въздействие за последно място mDER, измерени на 4.10.24г.

	S-cone-opic	M-cone-opic	L-cone-opic	Rhodopic	Melanopic
3000K 0°	0,268	0,762	1,018	0,444	0,370
3000K 45°	0,395	0,823	1,012	0,586	0,513
3000K 90°	0,417	0,831	1,011	0,603	0,533
4000K 0°	0,422	0,809	1,008	0,536	0,454
4000K 45°	0,525	0,864	1,004	0,667	0,605
4000K 90°	0,540	0,869	1,004	0,679	0,618
6500K 0°	0,748	0,920	0,987	0,762	0,708
6500K 45°	0,721	0,925	0,992	0,787	0,739
6500K 90°	0,724	0,925	0,993	0,792	0,746

Таблица 4. Данни за алфа опичното въздействие приравнени към 500lx mEDI, за последно място измерени на 4.10.24г.

	S-cone-opic	M-cone-opic	L-cone-opic	Rhodopic	Melanopic
3000K 0°	134	351	509	222	185
3000K 45°	197	411	505	293	256
3000K 90°	209	415	506	302	266
4000K 0°	211	404	504	268	227
4000K 45°	264	434	505	335	304
4000K 90°	269	433	500	338	308
6500K 0°	371	456	490	378	351
6500K 45°	361	464	498	395	371
6500K 90°	360	460	494	394	371

Таблица 5. Данни за алфа опичното въздействие за първо място mDER, измерени на 8.10.24г.

	S-cone-opic	M-cone-opic	L-cone-opic	Rhodopic	Melanopic
3000K 0°	0,602	0,885	1,008	0,730	0,683
3000K 45°	0,678	0,906	1,008	0,784	0,747
3000K 90°	0,663	0,901	1,008	0,774	0,735
4000K 0°	0,667	0,904	1,004	0,767	0,725
4000K 45°	0,704	0,915	1,005	0,799	0,763
4000K 90°	0,712	0,915	1,006	0,802	0,767
6500K 0°	0,772	0,937	0,997	0,833	0,798
6500K 45°	0,749	0,928	1,003	0,827	0,794
6500K 90°	0,754	0,927	1,003	0,826	0,794

Таблица 6. Данни за алфа опичното въздействие приравнени към 500lx mEDI, за първо място измерени на 8.10.24г.

	S-cone-opic	M-cone-opic	L-cone-opic	Rhodopic	Melanopic
3000K 0°	301	442	504	365	341
3000K 45°	339	453	503	392	373
3000K 90°	331	451	504	387	367
4000K 0°	332	449	499	381	360
4000K 45°	352	457	503	400	382
4000K 90°	356	457	503	401	383
6500K 0°	386	469	498	417	399
6500K 45°	374	464	501	413	397
6500K 90°	377	464	502	413	397

Таблица 7. Данни за алфа опичното въздействие за последно място mDER, измерени на 8.10.24г.

	S-cone-opic	M-cone-opic	L-cone-opic	Rhodopic	Melanopic
3000K 0°	0,449	0,844	1,011	0,637	0,572
3000K 45°	0,453	0,845	1,011	0,638	0,574
3000K 90°	0,453	0,845	1,011	0,638	0,574
4000K 0°	0,540	0,869	1,006	0,686	0,628
4000K 45°	0,569	0,881	1,007	0,720	0,668
4000K 90°	0,580	0,885	1,007	0,729	0,678
6500K 0°	0,685	0,913	0,997	0,772	0,725
6500K 45°	0,646	0,905	1,002	0,767	0,722
6500K 90°	0,645	0,904	1,003	0,767	0,722

Таблица 8. Данни за алфа опичното въздействие приравнени към 500lx mEDI, за последно място измерени на 8.10.24г.

	S-cone-opic	M-cone-opic	L-cone-opic	Rhodopic	Melanopic
3000K 0°	224	422	505	318	286
3000K 45°	226	422	505	319	287
3000K 90°	226	422	505	319	287
4000K 0°	270	434	503	343	314
4000K 45°	285	441	503	360	334
4000K 90°	290	442	503	364	339
6500K 0°	343	457	499	386	363
6500K 45°	323	452	501	384	361
6500K 90°	322	452	501	384	361

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На базата на получените експериментални данни могат да бъдат направени следните изводи:

Когато осветителната уредба в помещението е настроена на корелирана цветна температура на осветителите 6500K, влиянието на естествената светлина върху производството на меланопсин в ганглиевите клетки в зрителния анализатор е максимално, независимо от облачността навън, позицията и ъгъла на наблюдение на обитателите.

При корелирана цветна температура на осветителите в помещението от 3000K меланоопичното въздействие на светлината за първото работно място е средно с 20% по-значително при слънчев ден спрямо мрачен такъв, като този процент зависи от ъгъла на наблюдение – при ъгъл 0 градуса, разликата е най-голяма. За последното работно място, което е разположено най-близо до вътрешната стена на помещението, най-малко меланоопично въздействие ще има светлината при ъгъл на наблюдение 0 градуса, при мрачно време.

Резултатите за корелирана цветна температура на осветителите от 4000K са междинни.

На базата на направените изводи става ясно, че колкото по-висока е корелираната цветна температура на осветите-

лите, толкова по-голямо ще бъде и невизуалното им въздействие върху наблюдателите. Когато се прави оценка за интегрално осветление – при слънчев ден положителното въздействие на осветлението върху цикличните процеси в организма е значително, докато при мрачен ден, то е осезаемо по-малко.

Въпреки, че осветление с по-висока цветна температура би имало по-значително невизуално въздействие върху хората, такова трябва да се проектира и изпълнява, като се съблюдава и възможността за фотобиологичен риск от синя светлина. При продължително пребиваване на хора при подобни светлинни условия, те могат да доведат до неблагоприятни ефекти.

Благодарности: Научните изследвания, резултатите от които са представени в настоящата публикация, са финансирани от вътрешния конкурс на ТУ-София № 23/ИП0027-01.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] EN 12464-1:2021 Light and lighting - Lighting of work places - Part 1: Indoor work places.
- [2] M. T. Aguilar-Carrasco, S. Dominguez-Amarillo, I. Acosta, and J. J. Sendra, "Indoor lighting design for healthier workplaces: natural and electric light assessment for suitable circadian stimulus," *Opt. Express* 29, 29899-29917 (2021)
- [3] Khademagha, Parisa & Aries, Myriam & Rosemann, A.L.P. & van Loenen, Evert. (2016). Implementing non-image-forming effects of light in the built environment: A review on what we need. *Building and Environment*. 180. 263-272. 10.1016/j.buildenv.2016.08.035.
- [4] CIE CIE S 026/E:2018; CIE System for Metrology of Optical Radiation for IpRGC-Influenced Responses to Light; International Commission on Illumination (CIE), CIE Central Bureau: Vienna, Austria, 2018.
- [5] Rea, M.; Figueiro, M.; Bierman, A.; Hamner, R. Modelling the Spectral Sensitivity of the Human Circadian System. *Lighting Res. Technol.* 2012, 44, 386–396.
- [6] Lucas, R.J.; Peirson, S.N.; Berson, D.M.; Brown, T.M.; Cooper, H.M.; Czeisler, C.A.; Figueiro, M.G.; Gamlin, P.D.; Lockley, S.W.; O'Hagan, J.B.; et al. Measuring and Using Light in the Melanopsin Age. *Trends Neurosci.* 2014, 37, 1–9.