

# WYZNACZANIE POZIOMU EKSPOZYCJI NA PROMIENIOWANIE OPTYCZNE

## 1. Promieniowanie nielaserowe

- 1.1. Skutki oddziaływania promieniowania nielaserowego na organizm człowieka rozpatruje się w odniesieniu do skóry oraz oka i są one zależne przede wszystkim od:
  - a) poziomu promieniowania,
  - b) długości fali promieniowania,
  - c) czasu trwania ekspozycji,
  - d) rozmiaru obrazu źródła promieniowania na siatkówce oka dla  $\lambda=300-1400$  [nm].
- 1.2. Poziom promieniowania nielaserowego, w zależności od zakresu promieniowania i rodzaju zagrożenia, określa się przez podanie wartości następujących parametrów:
  - E *natężenie napromienienia* określane również jako *gęstość mocy*: gęstość powierzchniowa strumienia energetycznego padającego na daną powierzchnię, wyrażone w watach na metr kwadratowy [ $W \cdot m^{-2}$ ], lub
  - H *napromienienie*: iloczyn natężenia napromienienia i czasu ekspozycji, wyrażone w dżulach na metr kwadratowy [ $J \cdot m^{-2}$ ], lub
  - L *luminancja energetyczna* określana również jako *radiancja*: iloraz strumienia energetycznego wysyłanego przez daną powierzchnię w określonym kierunku oraz iloczynu rzutu tej powierzchni na płaszczyznę prostopadłą względem kierunku promieniowania i kąta bryłowego obejmującego kierunek promieniowania, wyrażona w watach na metr kwadratowy na steradian [ $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ ].
- 1.3. Poziom ekspozycji na promieniowanie nielaserowe wyznacza się zgodnie z wzorami przedstawionymi w tabeli 1, przy uwzględnieniu:
  - a) poziomu promieniowania ustalonego lub ocenionego zgodnie z przepisami § 3 ust. 1 lub ust. 2 pkt 1 rozporządzenia,
  - b) tłumienia uzyskanego dzięki zastosowaniu środków ochrony zbiorowej,
  - c) czasu trwania ekspozycji, określonego zgodnie z pkt 1.4,
  - d) wszystkich czynności związanych z eksploatacją źródła promieniowania nielaserowego w miejscu pracy w zakresie: obsługi, konserwacji, remontów, montażu i kontrolno-pomiarowym.
- 1.4. Określenie czasu trwania ekspozycji:
  - a) w przypadku zagrożenia fotochemicznego (lp. 1–4 w tabeli 1) należy określić całkowity czas ekspozycji w ciągu zmiany roboczej, bez względu na długość jej trwania,
  - b) w przypadku zagrożenia termicznego (lp. 5–8 w tabeli 1) należy określić czas jednorazowej ekspozycji.
- 1.5. Wyznaczone poziomy ekspozycji porównuje się z wartościami MDE dla promieniowania nielaserowego, określonymi zgodnie z przepisami w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy.

Tabela 1: Wzory do wyznaczania poziomu ekspozycji na promieniowanie nielaserowe

Lp.	Długość fali $\lambda$ [nm] i zakres promieniowania	Wzory do wyznaczania poziomu ekspozycji <sup>1)</sup>	Uwagi	Narząd	Rodzaj zagrożenia
1	180–400 (UVA, UVB i UVC)	$H_S = \int_0^t \int_{\lambda=180nm}^{\lambda=400nm} E(\lambda, t) \cdot S(\lambda) \cdot d\lambda \cdot dt$	czas (t) zgodny z pkt 1.4 lit. a	Okno: – rogówka – spojówka – soczewka	zapalenie rogówki, skrzydlak zapalenie spojówki zaćma fotochemiczna
2	315–400 (UVA)	$H_{UVA} = \int_0^t \int_{\lambda=315nm}^{\lambda=400nm} E(\lambda, t) \cdot d\lambda \cdot dt$		Okno – soczewka	zaćma fotochemiczna
3	300–700 (Światło niebieskie) <sup>2)</sup>	$L_B = \int_{\lambda=300nm}^{\lambda=700nm} L(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot d\lambda$	dla $\alpha \geq 11$ [mrad]	Okno – siatkówka	fotochemiczne uszkodzenie siatkówki
4		$E_B = \int_{\lambda=300nm}^{\lambda=700nm} E(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot d\lambda$	dla $\alpha < 11$ [mrad] <sup>3)</sup>		
5	380–1400 (VIS i IRA)	$L_R = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot d\lambda$	$\lambda_1 = 380$ [nm] $\lambda_2 = 1400$ [nm]	Okno – siatkówka	termiczne uszkodzenie siatkówki
6	780–1400 (IRA)		$\lambda_1 = 780$ [nm] $\lambda_2 = 1400$ [nm] (pomiarowe pole widzenia: 11 mrad) <sup>4)</sup>		
7	780–3000 (IRA i IRB)	$E_{IR} = \int_{\lambda=780nm}^{\lambda=3000nm} E(\lambda) \cdot d\lambda$	–	Okno: – rogówka – soczewka	oparzenie rogówki zaćma cieplna
8	380–3000 (VIS, IRA i IRB)	$H_{skóra} = \int_0^t \int_{\lambda=380nm}^{\lambda=3000nm} E(\lambda, t) \cdot d\lambda \cdot dt$	czas (t) zgodny z pkt 1.4 lit. b dla $t < 10$ s (dla $t \geq 10$ s należy dokonać oceny obciążenia termicznego organizmu – jak dla mikroklimatu gorącego)	Skóra	oparzenie

<sup>1)</sup> Przedstawione w tej kolumnie wzory całkowite można zastąpić wzorami sumacyjnymi z zastosowaniem wielkości dyskretnych.

<sup>2)</sup> Zakres od 300 do 700 [nm] obejmuje część nadfioletu UVB, cały nadfiolet UVA i większość światła VIS; zakres ten określa się jako „światło niebieskie” i wyodrębnia do oceny zagrożenia fotochemicznego siatkówki oka, przykładowo przy ekspozycji na promieniowanie optyczne emitowane przez łuk elektryczny. Światło niebieskie w wąskim znaczeniu obejmuje jedynie zakres w przybliżeniu od 400 do 490 [nm].

<sup>3)</sup> W odniesieniu do stałej obserwacji bardzo małych źródeł, których kąt widzenia  $< 11$  [mrad], można przekształcić skuteczną luminację energetyczną  $L_B$  na skuteczne natężenie napromienienia  $E_B$ . Zwykle dotyczy to jedynie narzędzi okulistycznych lub unieruchomienia oka podczas znieczulenia. Maksymalny „czas patrzenia” oblicza się za pomocą wzoru:  $t_{max} = 100/E_B$ , gdzie  $E_B$  jest wyrażone w  $[W \cdot m^{-2}]$ . Ze względu na ruch oczu podczas wykonywania zwykłych zadań wzrokowych wartość ta nie przekracza 100 s.

<sup>4)</sup> Pomiarowe pole widzenia – kąt przestrzenny widziany przez detektor, taki jak radiometr/spektrometriometr, z którego detektor odbiera promieniowanie, wyrażony w steradianach [sr].

Uwaga 1: Pola widzenia nie należy mylić z kątem widzenia  $\alpha$  (rozmiarem kątowym źródła obserwowalnego).

Uwaga 2: Czasami do opisu kąta przestrzennego pola widzenia o symetrii kołowej stosuje się kąt płaski [mrad].

**Opis wielkości występujących w tabeli 1:**

$\lambda$	długość fali promieniowania, wyrażona w nanometrach [nm];
t	czas trwania ekspozycji, wyrażony w sekundach [s];
$\alpha$	kąt widzenia: kąt widzenia źródła promieniowania, wyrażony w miliradianach [mrad];
$H_s$	skuteczne napromienienie oka lub skóry promieniowaniem UV: suma natężenia napromienienia oka lub skóry wyznaczonego według rozkładu widmowego $S(\lambda)$ w zakresie długości fali od 180 do 400 [nm], liczona dla danego czasu trwania ekspozycji, wyrażone w dżulach na metr kwadratowy [ $J \cdot m^{-2}$ ];
$E(\lambda, t), E(\lambda)$	widmowe natężenie napromienienia: strumień energetyczny o określonej długości fali padający na daną powierzchnię, wyrażone w watach na metr kwadratowy na nanometr [ $W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$ ];
$S(\lambda)$	rozkład widmowy skuteczności aktywności nadfioletu: względna skuteczność widmowa wywoływania uszkodzeń oczu i skóry przez promieniowanie UV z zakresu $\lambda=180-400$ [nm] (podana w tabeli 2) [bezwymiarowa];
$H_{UVA}$	napromienienie oka promieniowaniem UVA: suma natężenia napromienienia liczona dla danego czasu trwania ekspozycji w zakresie długości fali od 315 do 400 [nm], wyrażone w dżulach na metr kwadratowy [ $J \cdot m^{-2}$ ];
$L_B$	skuteczna luminancja energetyczna źródła wyznaczona według rozkładu widmowego $B(\lambda)$ , wyrażona w watach na metr kwadratowy na steradian [ $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ ];
$L(\lambda)$	widmowa luminancja energetyczna źródła: luminancja energetyczna źródła dla określonej długości fali promieniowania, wyrażona w watach na metr kwadratowy na steradian na nanometr [ $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1}$ ];
$B(\lambda)$	rozkład widmowy skuteczności fotochemicznego uszkodzenia siatkówki: względna skuteczność widmowa wywoływania uszkodzeń fotochemicznych siatkówki oka przez światło niebieskie z zakresu $\lambda=300-700$ [nm] (podana w tabeli 3) [bezwymiarowa];
$E_B$	skuteczne natężenie napromienienia: natężenie napromienienia wyznaczone według rozkładu widmowego $B(\lambda)$ , wyrażone w watach na metr kwadratowy [ $W \cdot m^{-2}$ ];
$L_R$	skuteczna luminancja energetyczna źródła wyznaczona według rozkładu widmowego $R(\lambda)$ , wyrażona w watach na metr kwadratowy na steradian [ $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ ];
$R(\lambda)$	rozkład widmowy skuteczności termicznego uszkodzenia siatkówki: względna skuteczność widmowa wywoływania uszkodzeń termicznych siatkówki oka przez promieniowanie widzialne i IRA z zakresu $\lambda=380-1400$ [nm] (podana w tabeli 3) [bezwymiarowa];
$E_{IR}$	natężenie napromienienia oka promieniowaniem IR: natężenie napromienienia oka w zakresie długości fali promieniowania podczerwonego od 780 do 3000 [nm], wyrażone w watach na metr kwadratowy [ $W \cdot m^{-2}$ ];
$H_{skóra}$	napromienienie skóry: suma natężenia napromienienia skóry liczona dla danego czasu trwania ekspozycji w zakresie długości fal promieniowania widzialnego i podczerwonego od 380 do 3000 [nm], wyrażone w dżulach na metr kwadratowy [ $J \cdot m^{-2}$ ].

Tabela 2: Rozkład widmowy skuteczności aktywności nadfioletu S( $\lambda$ )

$\lambda$ [nm]	S( $\lambda$ )	$\lambda$ [nm]	S( $\lambda$ )	$\lambda$ [nm]	S( $\lambda$ )	$\lambda$ [nm]	S( $\lambda$ )	$\lambda$ [nm]	S( $\lambda$ )
180	0,0120	224	0,1444	268	0,9192	312	0,0081	356	0,000153
181	0,0126	225	0,1500	269	0,9587	313	0,0060	357	0,000147
182	0,0132	226	0,1583	270	1,0000	314	0,0042	358	0,000141
183	0,0138	227	0,1658	271	0,9919	315	0,0030	359	0,000136
184	0,0144	228	0,1737	272	0,9838	316	0,0024	360	0,000130
185	0,0151	229	0,1819	273	0,9758	317	0,0020	361	0,000126
186	0,0158	230	0,1900	274	0,9679	318	0,0016	362	0,000122
187	0,0166	231	0,1995	275	0,9600	319	0,0012	363	0,000118
188	0,0173	232	0,2089	276	0,9434	320	0,0010	364	0,000114
189	0,0181	233	0,2188	277	0,9272	321	0,000819	365	0,000110
190	0,0190	234	0,2292	278	0,9112	322	0,000670	366	0,000106
191	0,0199	235	0,2400	279	0,8954	323	0,000540	367	0,000103
192	0,0208	236	0,2510	280	0,8800	324	0,000520	368	0,000099
193	0,0218	237	0,2624	281	0,8568	325	0,000500	369	0,000096
194	0,0228	238	0,2744	282	0,8342	326	0,000479	370	0,000093
195	0,0239	239	0,2869	283	0,8122	327	0,000459	371	0,000090
196	0,0250	240	0,3000	284	0,7908	328	0,000440	372	0,000086
197	0,0262	241	0,3111	285	0,7700	329	0,000425	373	0,000083
198	0,0274	242	0,3227	286	0,7420	330	0,000410	374	0,000080
199	0,0287	243	0,3347	287	0,7151	331	0,000396	375	0,000077
200	0,0300	244	0,3471	288	0,6891	332	0,000383	376	0,000074
201	0,0334	245	0,3600	289	0,6641	333	0,000370	377	0,000072
202	0,0371	246	0,3730	290	0,6400	334	0,000355	378	0,000069
203	0,0412	247	0,3865	291	0,6186	335	0,000340	379	0,000066
204	0,0459	248	0,4005	292	0,5980	336	0,000327	380	0,000064
205	0,0510	249	0,4150	293	0,5780	337	0,000315	381	0,000062
206	0,0551	250	0,4300	294	0,5587	338	0,000303	382	0,000059
207	0,0595	251	0,4465	295	0,5400	339	0,000291	383	0,000057
208	0,0643	252	0,4637	296	0,4984	340	0,000280	384	0,000055
209	0,0694	253	0,4815	297	0,4600	341	0,000271	385	0,000053
210	0,0750	254	0,5000	298	0,3989	342	0,000263	386	0,000051
211	0,0786	255	0,5200	299	0,3459	343	0,000255	387	0,000049
212	0,0824	256	0,5437	300	0,3000	344	0,000248	388	0,000047
213	0,0864	257	0,5685	301	0,2210	345	0,000240	389	0,000046
214	0,0906	258	0,5945	302	0,1629	346	0,000231	390	0,000044
215	0,0950	259	0,6216	303	0,1200	347	0,000223	391	0,000042
216	0,0995	260	0,6500	304	0,0849	348	0,000215	392	0,000041
217	0,1043	261	0,6792	305	0,0600	349	0,000207	393	0,000039
218	0,1093	262	0,7098	306	0,0454	350	0,000200	394	0,000037
219	0,1145	263	0,7417	307	0,0344	351	0,000191	395	0,000036
220	0,1200	264	0,7751	308	0,0260	352	0,000183	396	0,000035
221	0,1257	265	0,8100	309	0,0197	353	0,000175	397	0,000033
222	0,1316	266	0,8449	310	0,0150	354	0,000167	398	0,000032
223	0,1378	267	0,8812	311	0,0111	355	0,000160	399	0,000031
								400	0,000030

Tabela 3: Rozkład widmowy skuteczności fotochemicznego uszkodzenia siatkówki B( $\lambda$ ) i rozkład widmowy skuteczności termicznego uszkodzenia siatkówki R( $\lambda$ )

$\lambda$ [nm]	B( $\lambda$ )	R( $\lambda$ )
$300 \leq \lambda < 380$	0,01	–
380	0,01	0,1
385	0,013	0,13
390	0,025	0,25
395	0,05	0,5
400	0,1	1
405	0,2	2
410	0,4	4
415	0,8	8
420	0,9	9
425	0,95	9,5
430	0,98	9,8
435	1	10
440	1	10
445	0,97	9,7
450	0,94	9,4
455	0,9	9
460	0,8	8
465	0,7	7
470	0,62	6,2
475	0,55	5,5
480	0,45	4,5
485	0,32	3,2
490	0,22	2,2
495	0,16	1,6
500	0,1	1
$500 < \lambda \leq 600$	$10^{0,02 \cdot (450 - \lambda)}$	1
$600 < \lambda \leq 700$	0,001	1
$700 < \lambda \leq 1050$	–	$10^{0,002 \cdot (700 - \lambda)}$
$1050 < \lambda \leq 1150$	–	0,2
$1150 < \lambda \leq 1200$	–	$0,2 \cdot 10^{0,02 \cdot (1150 - \lambda)}$
$1200 < \lambda \leq 1400$	–	0,02

## 2. Promieniowanie laserowe

- 2.1. Skutki oddziaływania promieniowania laserowego na organizm człowieka rozpatruje się w odniesieniu do skóry oraz oka i są one zależne przede wszystkim od:
- poziomu promieniowania,
  - długości fali promieniowania,
  - czasu ekspozycji lub czasu trwania impulsu,
  - rozmiaru obrazu źródła promieniowania na siatkówce oka dla  $\lambda=400-1400$  [nm].
- 2.2. Rodzaje zagrożeń dla oka i skóry związanych z ekspozycją na promieniowanie laserowe są przedstawione w tabeli 4.

Tabela 4: Rodzaje zagrożeń dla oka i skóry związanych z ekspozycją na promieniowanie laserowe

Długość fali [nm]	Zakres	Narząd	Rodzaj zagrożenia
180–400	UV	oko	uszkodzenie fotochemiczne lub termiczne rogówki, spojówki lub soczewki
		skóra	rumień, uszkodzenie fotochemiczne lub termiczne
400–600	VIS	oko	uszkodzenie fotochemiczne siatkówki
400–700	VIS	oko	uszkodzenie termiczne siatkówki
		skóra	uszkodzenie termiczne lub fotochemiczne
700–1400	IRA	oko	uszkodzenie termiczne siatkówki
		skóra	uszkodzenie termiczne
1400–2600	IRB	oko	uszkodzenie termiczne rogówki oraz soczewki
2600–10 <sup>6</sup>	IRB, IRC	oko	uszkodzenie termiczne rogówki
1400–10 <sup>6</sup>	IRB, IRC	skóra	uszkodzenie termiczne

- 2.3. Poziom promieniowania laserowego, w zależności od zakresu promieniowania, rodzaju zagrożenia i trybu pracy lasera, określa się przez podanie wartości natężenia napromienienia  $E$  lub napromienienia  $H$ , które oblicza się na podstawie poniższych wzorów:

$$E = \frac{dP}{dA}$$

$$H = \int_0^t E(t) \cdot dt$$

gdzie:

$dP$  moc wyrażona w watach [W];

$dA$  powierzchnia wyrażona w metrach kwadratowych [m<sup>2</sup>];

$E(t)$ ,  $E$  natężenie napromienienia określane również jako *gęstość mocy*: strumień promienisty (energetyczny) padający na elementarną powierzchnię, wyrażone w watach na metr kwadratowy [W·m<sup>-2</sup>]; wartości  $E(t)$ ,  $E$  pochodzą z pomiarów lub mogą być podane przez producenta sprzętu;

$H$  *napromienienie*: całka natężenia napromienienia lub gęstości mocy liczona dla danego czasu ekspozycji, wyrażone w džulach na metr kwadratowy [J·m<sup>-2</sup>];

$t$ ,  $dt$  *czas, czas trwania ekspozycji* wyrażony w sekundach [s].

- 2.4. Poziom ekspozycji na promieniowanie laserowe (bezpośrednie lub odbite) wyznacza się przy uwzględnieniu:
- poziomu promieniowania ustalonego lub ocenionego zgodnie z przepisami § 3 ust. 1 lub ust. 2 pkt 1 rozporządzenia,
  - tłumienia uzyskanego dzięki zastosowaniu środków ochrony zbiorowej,
  - czasu trwania ekspozycji, określonego zgodnie z pkt 2.5,
  - wszystkich czynności, związanych z eksploatacją źródła promieniowania laserowego w miejscu pracy, w zakresie: obsługi, konserwacji, remontów, montażu i kontrolno-pomiarowym.
- 2.5. W zależności od analizowanego zagrożenia i trybu pracy lasera za czas trwania ekspozycji przyjmuje się: czas trwania impulsu, czas jednorazowej ekspozycji (zagrożenie termiczne) lub całkowity czas ekspozycji (zagrożenie fotochemiczne).
- 2.6. Wyznaczone poziomy ekspozycji porównuje się z odpowiednimi wartościami MDE dla promieniowania laserowego, określonymi zgodnie z przepisami w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. Jeżeli dla danej długości fali promieniowania laserowego istnieje więcej niż jedna wartość MDE, do porównania stosuje się wartość bardziej restrykcyjną.