

РАСЧЕТ ВИЗУАЛЬНОГО ВОСПРИЯТИЯ ЯРКОСТИ В УСЛОВИЯХ НИЗКОЙ ОСВЕЩЕННОСТИ

В.Б. Пясецкий

piasetsky@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Мезопическая фотометрия, предметом которой является визуальное восприятие низкоуровневого оптического излучения, — актуальная тема исследования в области светотехники. Это связано с исследованием реакций человека при визуальных наблюдениях в условиях низкой освещенности пространства предметов, определения оптимального уровня искусственного освещения производственных территорий, а также с решением задач офтальмологической периметрии. Методика расчетов в области мезопической фотометрии рекомендована Международной комиссией по освещению (МКО) и основана на расчете комбинации фотопического (дневного) и скотопического (ночного) уровней зрительного восприятия. Эта методика является итерационной, что делает ее неудобной для инженерных применений, поскольку число итерационных шагов в среднем составляет нескольких десятков, а в некоторых случаях достигает 100 и более. Поэтому может возникнуть вопрос о целесообразности применения методики МКО взамен методики, основанной на фотопическом зрительном восприятии. Критерий выбора — степень различия результатов, получаемых по этим методикам. Приведено сравнение результатов расчета уровня визуального восприятия яркости для фотопического и мезопического зрения в условиях низкой освещенности, а также возможности нахождения аналитических решений для методики МКО. Показано, что для излучений с цветовой температурой в диапазоне значений 950...12 000 К максимальное различие расчетов для фотопического и мезопического зрения составляет $-200...+50$ %, а наименьшее — около 5 % для излучения с цветовой температурой около 2000 К. Приведены аналитические решения по методике МКО для некоторых частных случаев

Ключевые слова

Световая эффективность излучения, мезопическая фотометрия, визуальная яркость, низкая освещенность

Поступила 09.04.2019

Принята 10.06.2019

© Автор(ы), 2020

Введение. В настоящее время интерес к оценке уровня визуального восприятия яркости пространства предметов в условиях низкой освещенности при переходе от дневных условий к ночным — мезопическому диапазону — связан с решением нескольких практических задач:

- исследование зависимости скорости принятия человеком решений при визуальных наблюдениях пространства предметов в условиях низкой освещенности, в частности скорости реакции водителей транспортных средств в условиях сумеречной освещенности;

- определение оптимального уровня искусственного освещения жилых и производственных территорий, в том числе скоростных транспортных магистралей [1–3];

- решение задач офтальмологической периметрии для обеспечения заданных значений низкого уровня яркости наблюдаемого фона [4].

В области инженерных расчетов такое направление является дополнением к методикам энергетического расчета оптико-электронных систем [5]. Актуальность темы подтверждается значительным числом публикаций, в том числе официальных документов Международной комиссии по освещению (МКО) [6–8]. Рекомендованная МКО методика расчета уровня визуального восприятия мезопической яркости представлена в техническом отчете CIE 191:2010 [9]. На русском языке основные положения этой методики приведены в работе [10]. Методика МКО предполагает итерационный процесс вычислений, в котором число итерационных шагов достигает нескольких десятков, а в некоторых случаях — 200 и более [11]. Следует также отметить, что границы мезопического диапазона, указанные в отчете МКО, значительно отличаются от таковых, приведенных в более ранних источниках, например [12].

Цель работы — определение степени различий результатов фотометрического расчета уровня визуального восприятия яркости по методике МКО для мезопического наблюдателя и стандартной — для фотопического наблюдателя, а также нахождение аппроксимирующих аналитических выражений для оценки визуального восприятия такой яркости в условиях сумеречного освещения для характерных частных случаев и оценка погрешностей таких выражений.

Материалы и методы решения задач. Предварительно необходимо уточнить задачи, для которых границы сумеречного диапазона яркости определяются по-разному.

Основная фотометрическая единица в системе СИ — кандела (кд), определение которой дано Генеральной конференцией мер и весов в 1979 г.: «Кандела — интенсивность света в данном направлении от источника мо-

нохроматического излучения с частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, интенсивность излучения которого в данном направлении равна $1/683$ Ватт на стерадиан» [13]. Частоте $540 \cdot 10^{12}$ Гц соответствует длина волны излучения 555 нм. Зрительному восприятию доступна яркость пространства предметов в диапазоне приблизительно $10^{-6} \dots 10^5$ кд/м² [12]. Однако это не означает, что наблюдатель одномоментно может адекватно воспринимать весь упомянутый диапазон. Изменению яркости пространства предметов относительно некоторого исходного уровня соответствует процесс адаптации — «привыкания» наблюдателя: переход к более светлому пространству сопровождается световой адаптацией — снижением световой чувствительности глаза, переход к более темному — темновой адаптацией — повышением световой чувствительности. Длительность темновой адаптации больше световой и оценивается как минимум в 30 мин [12]. Кроме того, в условиях значительного изменения яркости в процессе зрительного восприятия участвуют светочувствительные рецепторы различного типа: колбочки при высоких уровнях яркости (дневное зрение) и палочки при низких (ночное зрение). Характеристики световой чувствительности палочек и колбочек существенно различаются. В связи с этим весь диапазон яркости пространства предметов, доступный визуальному восприятию, делится на три интервала: 1) дневной (фотопическое зрение, обусловленное функционированием колбочек) с яркостью примерно $10^2 \dots 10^5$ кд/м²; 2) ночной (скотопическое зрение, связанное с реакцией палочек) с уровнем яркости $10^{-6} \dots 10^{-3}$ кд/м²; 3) сумеречный (мезопическое зрение), когда в визуальном восприятии излучения участвуют оба типа рецепторов (занимает промежуточное положение между дневным и ночным диапазонами).

Описание функций световой эффективности для фотопического и скотопического зрения относится к стандартному наблюдателю с уровнем восприятия, адаптированным к условиям наблюдения. В условиях дневного освещения световая эффективность излучения, лм/Вт, описывается функцией

$$K(\lambda) = 683,002V(\lambda) \approx 683V(\lambda), \quad (1)$$

в ночных условиях — функцией

$$K'(\lambda) = 1700,05V'(\lambda) \approx 1700V'(\lambda). \quad (2)$$

Функции $K(\lambda)$, $K'(\lambda)$ приведены в Международном стандарте ISO 23539:2005(E), основой которого является стандарт МКО [13].

В диапазоне промежуточных — сумеречных — значений яркости уровень зрительного восприятия зависит от соотношения реакций обоих типов зрительных рецепторов.

Оценку яркости пространства предметов при известной освещенности E достаточно просто можно выполнить в предположении диффузного характера отражательной характеристики ρ освещаемых предметов: $L = \rho E \pi^{-1}$. Однако игнорирование различий ночного и дневного уровней световосприятия может привести к заметной погрешности в такой оценке, полученной для фотопического зрения, когда значение максимальной световой эффективности излучения равно 683 лм/Вт. В частности, ГОСТ 26148–84 «Фотометрия. Термины и определения» в качестве основного понятия «световая величина» описывает только функцию световой эффективности для дневного зрения.

Визуальное восприятие яркости дневного и ночного уровней при некотором уровне адаптации описывается через соответствующую функцию световой эффективности:

фотопическая яркость

$$L_P = K_m L_{\lambda_{\max}} \int_0^{\infty} V(\lambda) \varphi(\lambda) d\lambda; \quad (3)$$

скотопическая яркость

$$L_S = K'_m L_{\lambda_{\max}} \int_0^{\infty} V'(\lambda) \varphi(\lambda) d\lambda. \quad (4)$$

Здесь $L_{\lambda_{\max}}$ — максимальное значение спектральной плотности энергетической яркости; $\varphi(\lambda)$ — нормированная функция спектральной плотности потока излучения в пространстве предметов.

Выражения (3) и (4) содержат характерные интегральные параметры:

$$I_1 = \int_0^{\infty} V(\lambda) \varphi(\lambda, T) d\lambda; \quad (5)$$

$$I_2 = \int_0^{\infty} V'(\lambda) \varphi(\lambda, T) d\lambda. \quad (6)$$

Расчет световой яркости для одного и того же излучения с относительным спектральным распределением $\varphi(\lambda)$ по (3) и (4) дает различный результат. В качестве примера на рис. 1 приведена зависимость отношения L_S/L_P в отношении излучения абсолютно черного тела (АЧТ) при различных значениях его температуры.

Погрешность расчета светового потока по фотопическому варианту нарастает при снижении уровня яркости пространства предметов ниже дневных значений — в мезопическом диапазоне — и достигает максимума

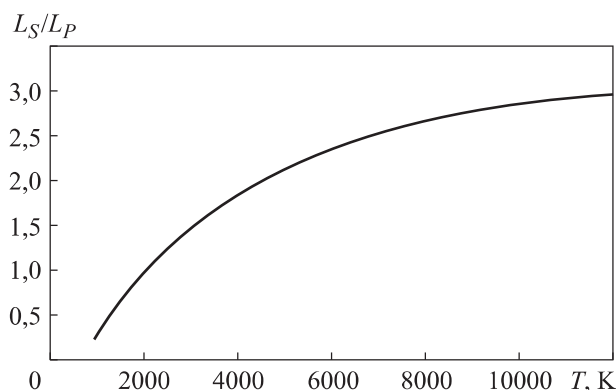


Рис. 1. Зависимость отношения L_S/L_P для излучения АЧТ при различных значениях температуры T

при значениях яркости, соответствующих верхнему уровню их ночных значений. Результаты расчета, приведенные в рассмотренном примере, свидетельствуют о том, что в зависимости от формы энергетического спектра визуально воспринимаемого излучения отношение L_S/L_P может достигать 3 и более.

Сумеречное визуальное восприятие пространства предметов описывается реакцией на излучение как колбочек, так и палочек, причем степень их вовлеченности в формирование зрительного ощущения зависит от уровня яркости адаптации. Поэтому для корректного выбора методики расчета необходимо точно определить граничные значения диапазона сумеречных уровней яркости. Верхнее граничное значение мезопического диапазона соответствует наименьшему значению фотопической яркости, определяемой по (3) с учетом функции световой эффективности (1). Нижнее граничное значение мезопического диапазона определяет наибольшее значение яркости, которое может быть рассчитано по (4) с учетом функции скотопической световой эффективности (2).

Нижняя граница дневного уровня яркости пространства предметов в работе [12] оценивается как 125 кд/м^2 , а верхняя граница ночного уровня яркости — как 10^{-3} кд/м^2 . Согласно [12], палочки — ночной тип зрительных рецепторов — в задачах сравнения цветов несамосветящихся метамерных цветовых стимулов не вносят вклад в формирование зрительных реакций при уровне яркости более 125 кд/м^2 . В тех случаях, когда спектральный состав таких стимулов отличается незначительно (невысокая степень метамеризма), это значение снижается. Результаты нескольких экспериментальных работ, которые учтены в техническом отчете МКО [9], представляют собой значительно более низкие значения яркости для верхней границы

сумеречного диапазона и очень близкие к оценке, приведенной в работе [12], для нижней границы: рекомендуемый МКО диапазон мезопической яркости пространства предметов определен как $5 \cdot 10^{-3} \dots 5 \text{ кд/м}^2$. Указанные граничные значения явились обобщением результатов работ, посвященных экспериментальным исследованиям визуального восприятия яркости пространства предметов в условиях освещения источниками различного типа (натриевыми лампами низкого и высокого давления, металлогалогенными лампами с различными значениями цветовой температуры, светодиодными источниками «белого» излучения). Учет специфики искусственного освещения светодиодными источниками [14] может быть основанием для снижения значения нижней границы фотопической яркости относительно 125 кд/м^2 , поскольку светодиодное освещение дает более высокий уровень цветового контраста по сравнению с другими источниками. Таким образом, в соответствии с рекомендациями МКО [9] при визуальном наблюдении несамосветящихся объектов с яркостью не менее 5 кд/м^2 качество цветовосприятия можно полагать фотопическим и вместе с тем, согласно [12], не соответствующим условиям корректной визуальной оценки цветовых различий. Можно сделать вывод, что значение нижней границы дневного диапазона, равное 5 кд/м^2 , относится к задачам визуальной оценки уровня яркостного контраста, но не к задачам сравнительного цветового анализа, где это значение должно быть существенно больше.

Различные варианты описания мезопической чувствительности глаза приведены в [15], однако все варианты так или иначе определяют ее как комбинацию фотопической и скотопической характеристик его чувствительности. В настоящее время общепринятой формой описания нормированной функции мезопической световой эффективности излучения является линейная комбинация функций $V(\lambda)$ и $V'(\lambda)$, представляемая в виде [9]:

$$M(m)V_{mes}(\lambda) = mV(\lambda) + (1 - m)V'(\lambda). \quad (7)$$

Здесь m — коэффициент, учитывающий относительный вклад фотопической и скотопической характеристик в функцию световой эффективности: $0 \leq m \leq 1$; $M(m)$ — нормализующий коэффициент, который определяется из условия $V_{mes \max} = 1$.

Выражение (7) позволяет наглядно представить характер трансформации абсолютной функции световой эффективности в мезопическом диапазоне (рис. 2) в соответствии с выражением

$$K_{mes}(\lambda) = mK(\lambda) + (1 - m)K'(\lambda). \quad (8)$$

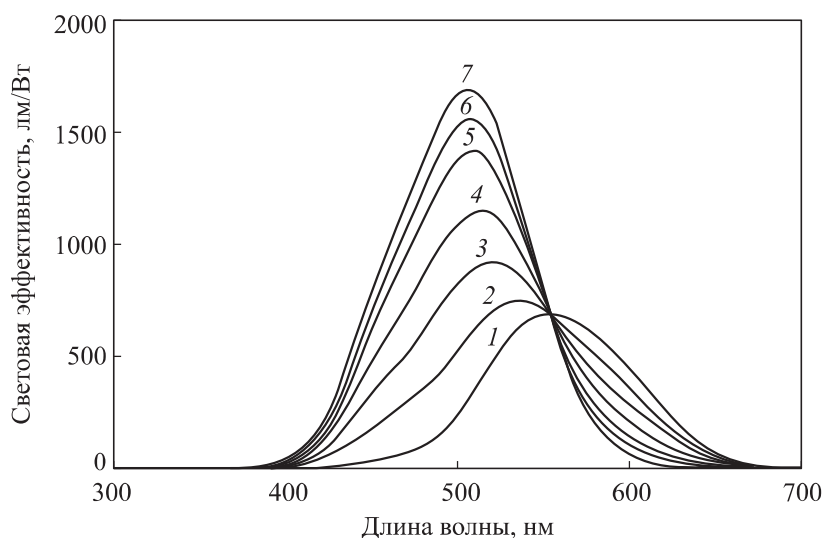


Рис. 2. Зависимость световой эффективности от длины волны в мезопической области при соотношениях фотопического и скотопического восприятия $m = 1$ (1), 0,8 (2), 0,6 (3), 0,4 (4), 0,3 (5), 0,1 (6) и 0 (7)

Характерная особенность приведенной на рис. 2 зависимости — сохранение значения световой эффективности на длине волны $\lambda_0 = 555$ нм в условиях наблюдения предметов с яркостью любого уровня.

Можно предположить, что уравнение (8) позволяет решить задачу нахождения мезопической яркости. Однако проблема заключается в том, что коэффициент m , описывающий соотношение между уровнями фотопической и скотопической зрительных реакций наблюдателя, не может быть определен как независимая от яркости переменная, поскольку является функцией мезопической яркости.

Зависимость коэффициента m от яркости в работе [16] представлена в виде линейного соотношения

$$m = \frac{L_{mes} - 0,001}{0,599 - 0,001}.$$

В этом выражении числовые параметры 0,599 и 0,001 — максимальное и минимальное значения диапазона яркости, рассматриваемого в настоящей работе. Если такой подход распространить на диапазон $5 \cdot 10^{-3} \dots 5$ кд/м²:

$$m = \frac{L_{mes} - 0,005}{5 - 0,005}, \quad (9)$$

то это позволит найти наиболее простое аналитическое решение задачи. Однако возникает вопрос о точности такого решения. Необходимо про-

вести его сравнение с результатами, которые могут быть найдены в соответствии с рекомендованной МКО методикой [9]:

$$L_{mes,n} = \frac{m_{(n-1)}L_P + (1 - m_{(n-1)})L_S V'(\lambda_0)}{m_{(n-1)} + (1 - m_{(n-1)})V'(\lambda_0)}; \quad (10)$$

$$m_n = a + b \lg(L_{mes,n}), \quad (11)$$

где $0 \leq m_n \leq 1$, $m_0 = 0,5$; $a = 0,7670$, $b = 0,3334$ — постоянные; $\lambda_0 = 555$ нм; $V'(\lambda_0) = 683/1700$ — значение функции относительной световой эффективности излучения для скотопического зрения на длине волны $\lambda_0 = 555$ нм; n — номер итерационного шага. Значения фотопической (L_P) и скотопической (L_S) яркостей определяются по (3) и (4).

Методика МКО позволяет достаточно просто найти решение обратной задачи: по заданному значению мезопической яркости L_{mes} , кд/м², определить максимальное значение спектральной плотности энергетической яркости пространства предметов $L_{\lambda \max}$, Вт/(м²·нм):

$$\begin{aligned} L_{\lambda \max} &= \frac{L_{mes}(1 + 1,489m)}{1700(mI_1 + (1 - m)I_2)} = \\ &= \frac{L_{mes}(4,315 + \lg L_{mes})}{1141,78((2,30 + \lg L_{mes})I_1 + (0,69897 - \lg L_{mes})I_2)}, \end{aligned} \quad (12)$$

где m — параметр, определяемый по (11); I_1 , I_2 — параметры, вычисляемые по (5) и (6). Уравнение (12) может использоваться в габаритном и энергетическом расчетах осветительных систем, обеспечивающих необходимый уровень яркости пространства предметов. Однако методика МКО для решения прямой задачи в инженерных расчетах является не самой удобной.

Методика МКО предлагает искать решения при различных соотношениях параметров L_S и L_P , обозначенных в работе [9] как

$$\frac{S}{P} = \frac{K'_m \int_0^{\infty} \varphi(\lambda) V'(\lambda) d\lambda}{K_m \int_0^{\infty} \varphi(\lambda) V(\lambda) d\lambda}.$$

В соответствии с (10) и (11) значения L_{mes} и m зависят от соотношения $S/P = L_S/L_P$. Как результат этой зависимости выражения (7) и (8) приобретают нелинейный характер. Можно сделать вывод, что уравне-

ние (9) дает некорректные результаты за исключением двух граничных значений: фотопического и скотопического уровней восприятия.

Формально параметр S/P , как любая интегральная величина, может иметь одинаковые значения для различных интегрируемых (в рассматриваемом случае — спектральных) функций. При равных значениях S/P такие решения будут соответствовать как излучению АЧТ, так и любым другим широкополосным излучениям — естественных и искусственных источников с соответствующими значениями цветовой температуры. Согласно ограничениям, которые определены в работе [9] для расчетов мезопических фотометрических параметров, такое утверждение некорректно в отношении монохроматических излучений и излучений с выраженной линейчатой формой спектра, а также при решении задач цветового анализа [12], поскольку касается метамерных стимулов. Однако в рамках рассматриваемой задачи, связанной с определением яркости полихроматического видимого излучения, его можно полагать справедливым, поскольку это не противоречит условиям применения методики МКО.

Основное содержание расчета параметра S/P — нахождение значений интегральных параметров I_1 и I_2 , которые зависят от характеристик относительной световой эффективности $V(\lambda)$ и $V'(\lambda)$. В стандартном виде функции $V(\lambda)$ и $V'(\lambda)$ задаются в виде числовых массивов [13], что не всегда удобно для проведения расчетов, в том числе для нахождения параметра S/P . Для инженерных расчетов более удобны аппроксимирующие аналитические выражения [16]:

$$\begin{aligned}
 V(\lambda) = & 0,23919 \exp\left(-\frac{\lambda - 530,52}{850,73}\right)^2 + 0,91063 \exp\left(-\frac{\lambda - 565,62}{3323,3}\right)^2 + \\
 & + 0,03101 \exp\left(-\frac{\lambda - 463,87}{658,13}\right)^2; \quad (13) \\
 V'(\lambda) = & 0,99927 \exp\left(-\frac{\lambda - 507,05}{2522,3}\right)^2 + 0,18215 \exp\left(-\frac{\lambda - 449,42}{646,47}\right)^2.
 \end{aligned}$$

Формулы (13) позволяют рассчитать необходимые значения световой эффективности с отклонением не более 2 % от стандартных значений функций в области их максимумов.

Нормированную функцию спектрального распределения $\varphi^0(T, \lambda)$ энергии излучения АЧТ с учетом числовых значений физических постоянных, входящих в законы Планка и смещения Вина, для температуры T и длины волны λ можно представить как

$$\varphi^0(T, \lambda) = 142,3 \left(\frac{2896^5}{\lambda^5 T^5 \cdot 10^{-15}} \right) \left(\frac{1}{\exp\left(\frac{4965 \cdot 2896}{\lambda T}\right) - 1} \right). \quad (14)$$

При решении практических задач основным вопросом является соотношение между фотопическими и мезопическими значениями рассчитанных уровней восприятия яркости по заданному спектру излучения. Из (10) с учетом (3)–(6) можно найти искомую зависимость между значениями L_P и L_{mes} :

$$\begin{aligned} L_P &\approx \frac{0,549 L_{mes} (4,318 + \lg L_{mes})}{(2,3 + \lg L_{mes}) + 0,402(0,6989 - \lg L_{mes})} \frac{S}{P} = \\ &= \frac{0,549 L_{mes} (4,318 + \lg L_{mes})}{(2,3 + \lg L_{mes}) + (0,6989 - \lg L_{mes})} \frac{I_2}{I_1}. \end{aligned}$$

Рассчитанные значения параметров I_1 , I_2 и S/P при некоторых значениях температуры АЧТ с учетом (14) приведены в таблице.

Значения интегральных параметров I_1 , I_2 и параметра S/P для различных значений температуры АЧТ

T , К	I_1 , нм	I_2 , нм	S/P
950	$3,646 \cdot 10^{-4}$	$3,34 \cdot 10^{-5}$	0,228
1500	0,367	0,09	0,608
2000	5,203	1,968	0,941
3500	69,09	46,88	1,689
4500	100,10	81,23	2,02
5500	104,62	95,16	2,264
6500	94,57	93,05	2,449
7500	79,86	83,16	2,592
8500	65,34	70,99	2,704
9000	58,76	64,97	2,752

Результаты расчета позволяют сделать следующий вывод: излучение с цветовой температурой около 2000 К дает самые близкие значения фотопической и мезопической яркости. В свою очередь, в оценках визуальной реакции с учетом допустимой погрешности (не более 5 % в области наименьших значений яркости) это позволяет ограничиваться расчетом фотопической яркости независимо от ее уровня, полагая $L_{mes} \approx L_P$. Для прочих значений цветовой температуры параметры L_P и L_S суще-

ственно различаются — тем больше различие, чем выше текущее значение цветовой температуры отличается от 2000 К и чем ниже уровень освещенности пространства предметов. Рассчитанные зависимости $L_{mes}(L_P)$ для трех значений температуры в логарифмическом масштабе приведены на рис. 3.

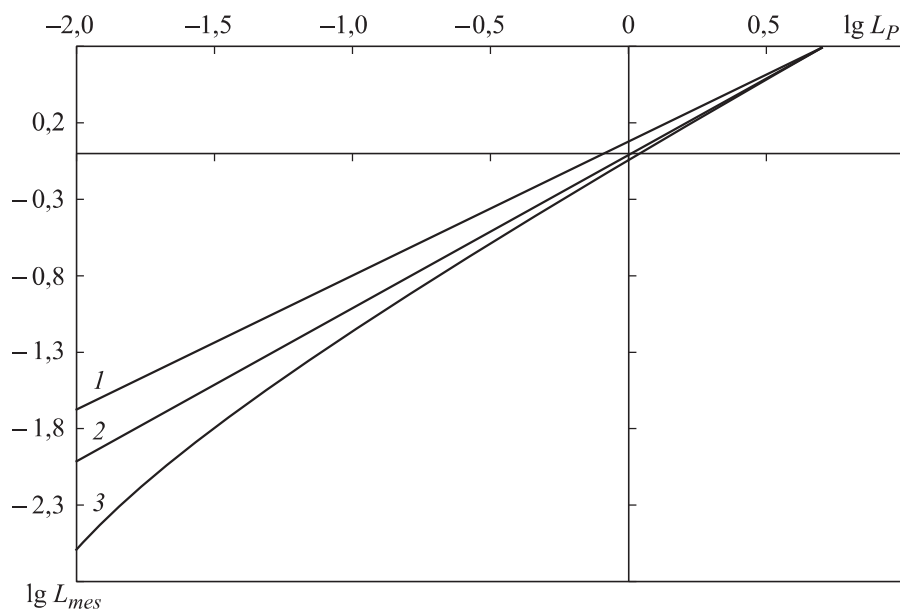


Рис. 3. Зависимость $\lg L_{mes}$ от $\lg L_P$ для излучений при температуре 9000 (1), 2000 (2) и 950 К (3)

Представленные зависимости можно описать аппроксимирующими полиномиальными выражениями:

$$\begin{aligned} \lg(L_{mes}^{9500 \text{ К}}) &= 10^{-4}(\lg L_P)^6 + 2 \cdot 10^{-4}(\lg L_P)^5 + 10^{-4}(\lg L_P)^4 - \\ &- 1,1 \cdot 10^{-3}(\lg L_P)^3 + 7,9 \cdot 10^{-3}(\lg L_P)^2 + 0,8977(\lg L_P) + 0,0679; \\ \lg(L_{mes}^{2000 \text{ К}}) &= 2 \cdot 10^{-4}(\lg L_P)^6 + 7 \cdot 10^{-4}(\lg L_P)^5 + 2 \cdot 10^{-4}(\lg L_P)^4 - \\ &- 5 \cdot 10^{-4}(\lg L_P)^3 - 1,1 \cdot 10^{-3}(\lg L_P)^2 + 1,0042(\lg L_P) - 0,0024; \\ \lg(L_{mes}^{950 \text{ К}}) &= -2,87 \cdot 10^{-2}(\lg L_P)^6 - 9,76 \cdot 10^{-2}(\lg L_P)^5 - \\ &- 6,41 \cdot 10^{-2}(\lg L_P)^4 + 0,1072(\lg L_P)^3 + 2,53 \cdot 10^{-2}(\lg L_P)^2 + \\ &+ 1,0353(\lg L_P) - 0,0394. \end{aligned}$$

Значения L_{mes} , рассчитанные по приведенным выше выражениям, незначительно отличаются от значений, определенных по методике МКО: погрешности 0,8 % для излучения с температурой 950 К и 0,3 % для излучения

с температурой 2000 и 9000 К при наименьших значениях фотопической яркости $0,01 \text{ кд/м}^2$. Погрешность расчета увеличивается при вычислении пороговых значений L_{mes} , близких к L_s . Можно исходить из того, что при таких значениях яркости (менее $0,01 \text{ кд/м}^2$) характеристика световой эффективности $V_{mes}(\lambda)$ становится неотличимой от скотопической. В частности, кривые световой эффективности (см. рис. 1) при $m = 0,01$ ($L_{mes} = 0,01 \text{ кд/м}^2$) и $m = 0$ ($L_{mes} = 0,005 \text{ кд/м}^2$) совпадают при сохранении масштаба графического представления. Поэтому в инженерных оценках можно ориентироваться на скотопическую реакцию наблюдателя при значениях яркости пространства предметов L_{mes} , меньших $0,01 \text{ кд/м}^2$.

Зависимости погрешностей, возникающих при определении уровня визуально воспринимаемой яркости в условиях низкой освещенности только по фотопической характеристике наблюдателя, приведены на рис. 4. Эти зависимости показывают, что наибольшая погрешность в таких расчетах возникает при наименьших значениях мезопической яркости, близких к скотопическим значениям: для низких значений температуры (менее 2000 К) погрешность имеет положительное значение (завышенный результат), для высоких значений температуры (более 2000 К) — отрицательное значение (заниженный результат).

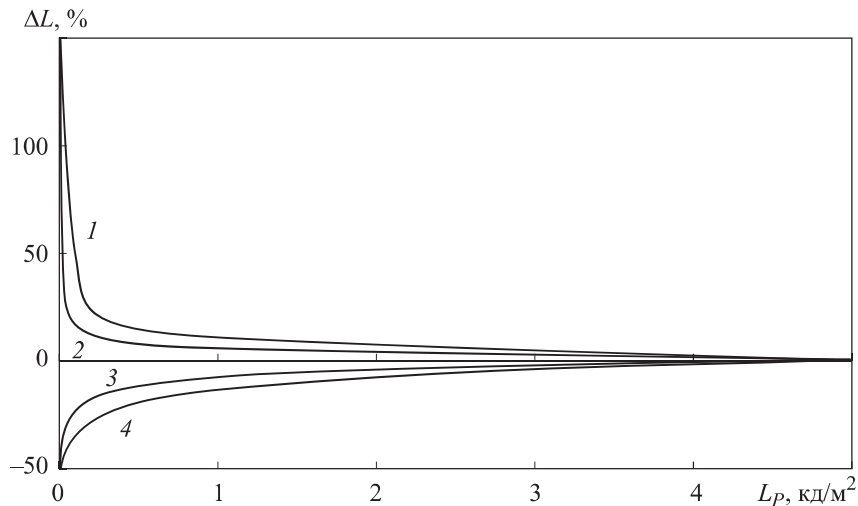


Рис. 4. Зависимость $\Delta L = (L_p - L_{mes})/L_{mes}$ от параметра L_p для излучений с температурой 950 (1), 1400 (2), 4200 (3) и 9100 К (4)

Заключение. В задачах визуальной оценки яркостного контраста пространства предметов в условиях низкой освещенности следует учитывать мезопический диапазон яркости $5 \cdot 10^{-3} \dots 5 \text{ кд/м}^2$.

Нижняя граница фотопического диапазона яркости пространства предметов, равная 125 кд/м^2 , должна использоваться в задачах сравнительного цветового анализа.

Расчет уровня визуального восприятия яркости пространства предметов в условиях низкой освещенности для фотопического наблюдателя МКО приводит к погрешности, значение которой зависит от цветовой температуры излучения.

Для излучений с цветовой температурой $1000 \dots 12\,000 \text{ К}$ значение погрешности расчета по фотопическому наблюдателю принадлежит диапозону $-200 \dots 75 \%$.

Существуют излучения со спектрами, для которых выполняется условие равенства фотопической и скотопической визуальных реакций наблюдателя, в частности, излучения с цветовой температурой около 2000 К . В этих случаях расчет визуального восприятия яркости в условиях низкой освещенности может быть основан на фотопическом описании световой эффективности излучения.

Максимальная погрешность фотопического расчета для излучения с цветовой температурой 2000 К составляет примерно 5% .

Расчет зрительного восприятия яркости для скотопического наблюдателя дает удовлетворительный результат при уровнях яркости пространства предметов не более 10^{-2} кд/м^2 , причем это значение должно быть определено для мезопического наблюдателя при заданном спектральном распределении наблюдаемого излучения.

Методика МКО позволяет найти аналитическое решение обратной задачи: рассчитать значение максимальной спектральной плотности энергетической яркости пространства предметов для заданного уровня мезопической световой яркости. При известной спектральной отражательной характеристике пространства предметов она позволяет определить соответствующий уровень энергетической облученности и рассчитать поток излучения осветительной системы.

Предложенная методика, основанная на применении аппроксимирующих аналитических выражений, позволяет получать значения световых фотометрических параметров в условиях мезопической яркости пространства предметов с погрешностью, не превышающей 1% относительно результатов, получаемых по методике МКО.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ylinen A.-M., Tähkämö L., Puolakka M., et al. Road lighting quality, energy efficiency, and mesopic design — LED street lighting case study. *Leukos*, 2011, vol. 8, no. 1, pp. 9–24. DOI: <https://doi.org/10.1582/LEUKOS.2011.08.01.001>
- [2] Bullough J.D., Radetsky L.C. Analysis of new highway lighting technologies. Final report. New York, Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute Troy, 2013.
- [3] Dubnicka R. Mesopic illuminance meter based on CCD fibre-optics spectroradiometer. Bratislava, Institute of Power and Applied Electrical Engineering, 2013.
- [4] Оценки влияния яркости световых объектов и фона на уровни световосприятия. *optimed-sktb.ru: веб-сайт*. URL: <http://optimed-sktb.ru/iso.pdf> (дата обращения: 23.03.2019).
- [5] Пясецкий В.Б., Прытов А.Б., Ширанков А.Ф. Оценка энергетического спектра естественной облученности. *Сб. науч. тр. Лазеры в науке, технике, медицине*. Т. 26. М., МНТОРЭС им. А.С. Попова, 2015, с. 169–170.
- [6] CIE 81:1989. Mesopic photometry: history, special problems and practical solutions. Vienna, CIE, 1989.
- [7] CIE 141:2001. Testing of supplementary systems of photometry. Vienna, CIE, 2001.
- [8] CIE 100:1992. Fundamentals of the visual task of night driving. Vienna, CIE, 1992.
- [9] CIE 191:2010. Recommended system for mesopic photometry based on visual performance. Vienna, CIE, 2010.
- [10] Пуолакка М., Халонен Л. Фотометрия в условиях сумеречного зрения — новая рекомендованная МКО система. *lightingmedia.ru: веб-сайт*. URL: http://www.lightingmedia.ru/reviews/reviews_63.html (дата обращения: 23.03.2019).
- [11] Gao C., Zhang X., Xu Y., et al. Theoretical consideration on convergence of the fixed-point iteration method in CIE mesopic photometry system MES2. *Opt. Express*, 2018, vol. 26, iss. 24, pp. 31351–31362. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.26.031351>
- [12] Джадд Д., Вышецки Г. Цвет в науке и технике. М., Мир, 1978.
- [13] ISO 23539:2005(E)/CIE S 010/E:2004. Photometry — the CIE system of physical photometry. Vienna, CIE, 2004.
- [14] Павлов В.Ю., Пясецкий В.Б., Хорохоров А.М. и др. Цветовая эффективность светодиодных осветительных систем. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2017, № 5, с. 54–69. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2017-5-54-69>
- [15] Rea M.S., Bullough J.D., Freyssinier-Nova J.P., et al. A proposed unified system of photometry. *Light. Res. Technol.*, 2004, vol. 36, iss. 2, pp. 85–111. DOI: <https://doi.org/10.1191/1365782804li114oa>
- [16] Poelman D., Smet P.F. Photometry in the dark: time dependent visibility of low intensity light sources. *Opt. Express*, 2010, vol. 18, iss. 25, pp. 26293–26299. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.18.026293>

Пясецкий Вячеслав Борисович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Пясецкий В.Б. Расчет визуального восприятия яркости в условиях низкой освещенности. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2020, № 1 (130), с. 33–49. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2020-1-33-49>

**ESTIMATING PERCEIVED BRIGHTNESS
IN LOW LUMINANCE CONDITIONS**

V.B. Pyasetsky

piasetsky@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

Mesopic photometry, which studies visual perception of low-level optical radiation, is of great interest today in lighting engineering. It involves investigating human responses to visual observations in low light conditions in the object space, determining the optimum artificial illumination levels in industrial areas, and solving clinical perimetry problems. The estimation procedure for mesopic photometry recommended by the International Commission on Illumination (CIE) is based on computing a combination of photopic (daylight) and scotopic (nighttime) visual perception levels. This procedure being iterative makes it inconvenient to apply in engineering practice, as the number of iterative steps proves to be several dozens on average, exceeding a hundred in certain cases. As a result, the feasibility of using the CIE procedure instead of a purely photopic perception technique becomes questionable. The discrepancy in the results obtained via these methods informs the selection criterion. The paper compares computation results for perceived brightness in photopic and mesopic vision in low luminance conditions. We also establish whether it is possible to find analytical solutions using the CIE procedure. We show that, for radiation of a colour temperature in the range of 950–12000 K, the maximum computational discrepancy between photopic and mesopic vision scenarios lies in the

Keywords

Luminous efficacy of radiation, mesopic photometry, visual brightness, low luminance

–200–50 % range, while the minimum discrepancy is approximately 5 % for radiation characterised by a colour temperature of approximately 2000 K. We also present analytical solutions for several specific cases according to the CIE procedure

Received 09.04.2019

Accepted 10.06.2019

© Author(s), 2020

REFERENCES

- [1] Ylinen A.-M., Tähkämö L., Puolakka M., et al. Road lighting quality, energy efficiency, and mesopic design — LED street lighting case study. *Leukos*, 2011, vol. 8, iss. 1, pp. 9–24. DOI: <https://doi.org/10.1582/LEUKOS.2011.08.01.001>
- [2] Bullough J.D., Radetsky L.C. Analysis of new highway lighting technologies. Final report. New York, Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute Troy, 2013.
- [3] Dubnicka R. Mesopic illuminance meter based on CCD fibre-optics spectroradiometer. Bratislava, Institute of Power and Applied Electrical Engineering. 2013.
- [4] Otsenki vliyaniya yarkosti svetovykh ob'ektov i fona na urovni svetovospriyatinya. *optimed-sktb.ru: website* (in Russ.). Available at: <http://optimed-sktb.ru/iso.pdf> (accessed: 23.03.2019).
- [5] Pyasetskiy V.B., Prytov A.B., Shirankov A.F. [Assessment of natural irradiance energy spectrum]. *Lazery v nauke, tekhnike, meditsine. T. 26* [Lasers in Science, Technics, Medicine. Vol. 26]. Moscow, MNTORES im. A.S. Popova Publ., 2015, pp. 169–170 (in Russ.).
- [6] CIE 81:1989. Mesopic photometry: history, special problems and practical solutions. Vienna, CIE, 1989.
- [7] CIE 141:2001. Testing of supplementary systems of photometry. Vienna, CIE, 2001.
- [8] CIE 100:1992. Fundamentals of the visual task of night driving. Vienna, CIE, 1992.
- [9] CIE 191:2010. Recommended system for mesopic photometry based on visual performance. Vienna, CIE, 2010.
- [10] Puolakka M., Khalonen L. Fotometriya v usloviyakh sumerechnogo zreniya — novaya rekomendovannaya MKO sistema [Photometry in conditions of mesopic vision — new system, recommended by CIE]. *lightingmedia.ru: website* (in Russ.). Available at: http://www.lightingmedia.ru/reviews/reviews_63.html (accessed: 23.03.2019).
- [11] Gao C., Zhang X., Xu Y., et al. Theoretical consideration on convergence of the fixed-point iteration method in CIE mesopic photometry system MES2. *Opt. Express*, 2018, vol. 26, iss. 24, pp. 31351–31362. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.26.031351>
- [12] Judd D.B., Wyszecki G. Color in business, science, and industry. Wiley-Interscience, 1975.
- [13] ISO 23539:2005(E)/CIE S 010/E:2004. Photometry — the CIE system of physical photometry. Vienna, CIE, 2004.

[14] Pavlov V.Yu., Pyasetsky V.B., Khorokhorov A.M., et al. LED lighting systems color efficiency. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2017, no. 5 (116), pp. 54–69 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2017-5-54-69>

[15] Rea M.S., Bullough J.D., Freyssinier-Nova J.P., et al. A proposed unified system of photometry. *Light. Res. Technol.*, 2004, vol. 36, iss. 2, pp. 85–111.

DOI: <https://doi.org/10.1191/1365782804li1140a>

[16] Poelman D., Smet P.F. Photometry in the dark: time dependent visibility of low intensity light sources. *Opt. Express*, 2010, vol. 18, iss. 25, pp. 26293–26299.

DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.18.026293>

Pyasetsky V.B. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Laser and Optoelectronic Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Bauman-skaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Pyasetsky V.B. Estimating perceived brightness in low luminance conditions. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2020, no. 1 (130), pp. 33–49 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2020-1-33-49>