

О влиянии положения наблюдателя на результаты фотометрических измерений в условиях сумеречного зрения*

М. МАКСИМАЙНЕН, М. ПУОЛАККА, Э. ТЕТРИ, Л. ХАЛОНЕН

Университет Аалто, Эспо, Финляндия

E-mail: eino.tetri@aalto.fi

Аннотация

Описанную в *CIE191:2010* систему фотометрии в условиях сумеречного зрения невозможно применять в полной мере, не определив яркость адаптации. Яркостью адаптации считают среднюю яркость поля адаптации, то есть некоего участка в пределах поля зрения. Имеющие высокую яркость источники могут увеличивать уровень адаптации, формируя вуалирующую яркость. И вуалирующая яркость, и средняя яркость поля адаптации могут изменяться в зависимости от положения наблюдателя. В данной работе относительное среднеквадратичное отклонение значений средней яркости полей адаптации, полученных при разных положениях наблюдателя, составило 7%. Вуалирующая яркость увеличивала уровень адаптации в среднем на 25%. Относительное среднеквадратичное отклонение значений яркости в условиях сумеречного зрения, полученных при разных положениях наблюдателя, составило 4,4%. Но так как яркость адаптации слабо зависит от положения, то одно-единственное положение наблюдателя может оказаться достаточным для проведения фотометрических измерений в условиях сумеречного зрения.

Ключевые слова: яркость адаптации, поле адаптации, фотометрия в условиях сумеречного зрения, вуалирующая яркость.

1. Введение

Фотометрия в условиях сумеречного зрения была разработана для улучшения точности светотехнических измерений. Описанную в *CIE191:2010* систему фотометрии в условиях сумеречного зрения можно использовать для расчёта яркости в условиях сумеречного зрения при известных яркости в условиях дневного зрения и спектре излучения светильника [1]. Однако предложенную в *CIE191:2010* систему невозможно применять в полной мере, не определив яркость адаптации L_a . Яркость адаптации можно считать среднюю яркость поля адаптации, то есть некоего участка в пределах поля зрения. В идеале, яркость адаптации эквивалентна состоянию адаптации сетчатки. Однако источник блёскости может приводить к возникновению вуалирующей яркости из-за внутрглазного рассеяния света [2]. Вуалирующая яркость увеличивает уровень адаптации, однако средняя яркость поля адаптации увеличивается толь-

ко тогда, когда источник блёскости находится в пределах поля адаптации.

Одной из основных областей применения фотометрии в условиях сумеречного зрения является освещение дорог. Измерение освещения дорог в настоящее время производится при одном-единственном расположении наблюдателя: на расстоянии 60 м от осветительной опоры, в центре полосы дороги и на высоте 1,5 м от поверхности дороги [3]. Этот метод позволяет получать необходимую информацию о яркости дорожного покрытия в условиях сумеречного зрения. Однако применительно к фотометрии в условиях сумеречного зрения яркость адаптации зависит не только от дорожного покрытия, но и от прилегающих к дороге участков. Кроме того, на уровень адаптации влияет вуалирующая яркость, которая зависит от положения наблюдателя. И в-третьих, автомобили обычно движутся вдоль дороги, а не стоят неподвижно. Поэтому важно установить зависимость между продольным положением наблюдателя и яркостью в условиях сумеречного зрения.

В данной работе исследована зависимость яркости в условиях сумеречного зрения от продольного положения наблюдателя.

2. Методы

2.1. Поля зрительной адаптации

Авторами проведена серия измерений с использованием яркомера на приборах с зарядовой связью *LMK Mobile Advanced* с фокусным расстоянием объектива 55 мм. Измерения производились на улице *Munkkiniemetranta*, находящейся в г. Хельсинки, Финляндия. Эта улица относится к классу *ME4b* по освещению [4], и освещалась светильниками с СД *AEC Illuminazione LED-in 1H-ST 4.5–63* (103 Вт, 4000 К). Светильники были установлены на опорах и располагались справа от линии зрения наблюдателя. Высота установки светильников была равна 8,1 м, а расстояние между двумя соседними опорами составляло 30 м. Све-

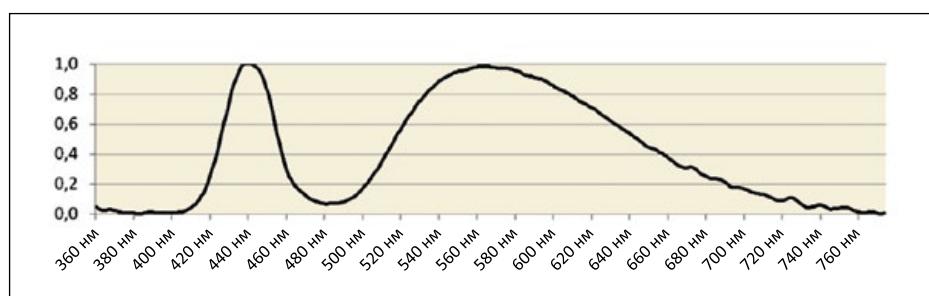


Рис. 1. Относительное спектральное распределение энергии излучения светильника с СД *AEC Illuminazione LED-in 1H-ST 4.5–63*

* Перевод с англ. Е.И. Розовского

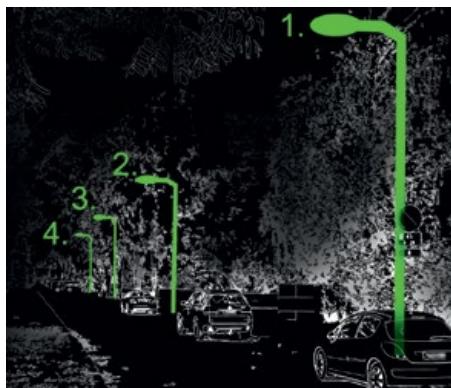


Рис. 2. Схематическое изображение светильной установки на улице *Munkkiniemetranta* (светильники 1, 2, 3 и 4 выделены зелёным цветом)

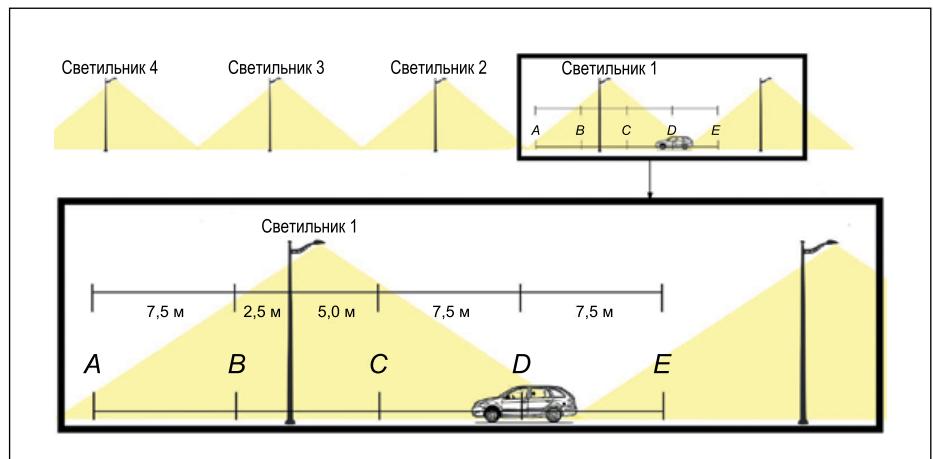


Рис. 3. Точки измерения *A, B, C, D* и *E* и расстояния между ними и светильниками

тильники имели отношение S/P , равное 1,44. Спектр излучения светильника приведён на рис. 1.

Измерения яркости проводились изнутри автомобиля с места расположения водителя. Яркомер на приборах с зарядовой связью располагался на высоте 1,3 м от поверхности дороги. В горизонтальной плоскости наблюдатель находился на полосе дороги на расстоянии 2 м от её правой границы, что считалось соответствующим расположению водителя. Измерения яркости проводились в пяти точках измерения (*A, B, C, D* и *E*). Расстояние между соседними точками измерения было равно 7,5 м. В процессе измерений автомобиль был припаркован на полосе дороги. В зависимости от точки измерения, в поле зрения находились три или четыре уличных светильника. Условия проведения измерений продемонстрированы на рис. 2 и 3. Во время проведения измерений на полосе находился ещё один припаркованный автомобиль, но у него были включены только парковочные фонари. Световые потоки светильников с СД можно было регулировать посредством изменения тока. Измерения яркости проводились при трёх уровнях светового потока: 100, 70 и 50%.

Размеры, форма и местоположение поля зрительной адаптации всё ещё нуждаются в конкретизации. Поэтому в данной работе были рассмотрены пять разных по-

лей адаптации. Четыре из пяти полей имели форму круга с центром в конце полосы, на которой находился наблюдатель. Размеры этих круговых полей адаптации $1^\circ, 2^\circ, 5^\circ$ и 10° . Эти круговые поля адаптации в какой-то степени отражают распределение точек фиксации глаз водителя [5, 6]. Пятым полем адаптации являлась поверхность дороги, так как это поле в настоящее время используется в качестве поля измерения в техническом отчёте МКО *CIE140:2000*, посвящённом расчёту параметров дорожного освещения, и в приведённых в EN13201–3 методах расчёта параметров дорожного освещения [3, 7]. Однако в данной работе поле адаптации «на поверхности дороги» было привязано только к рассматриваемой полосе дороги.

2.2. Вуалирующая яркость

Вуалирующая яркость определялась при помощи предложенного МКО уравнения для расчёта слепящей блёскости [8]:

$$L_{veil} = E_{gl} \left\{ \frac{\frac{10}{\theta^2} + \left[\frac{5}{\theta^2} + \frac{0,1 \cdot p}{\theta} \right]}{\left[1 + \left(\frac{A}{62,5} \right)^4 \right] + 0,0025 \cdot p} \right\}, \quad (1)$$

где L_{veil} – вуалирующая яркость, θ – угол (в градусах) между точкой фиксации зрения и источником с высокой яркостью, E_{gl} – освещённость в вертикальной плоскости на глазе наблюдателя, так что вертикальную освещённость умножают на косинус угла между проходящей через глаз наблюдателя горизонтальной плоскостью и прямой, соединяющей глаз наблюдателя и источник света, A – возраст наблюдателя в годах, p – коэффициент пигментации глаза. В данной работе возрастом наблюдателя считался средний возраст населения Финляндии (43 года). Коэффициент пигментации считался равным 0,9, что соответствует довольно светлым глазам.

В продольном направлении вуалирующую яркость рассчитывали для 25 положений наблюдателя. При этом наблюдатель располагался в точках *A, B, C, D* и *E* (рис. 3). Кроме того, вуалирующую яркость рассчитывали применительно к 20 дополнительным точкам, по пять между

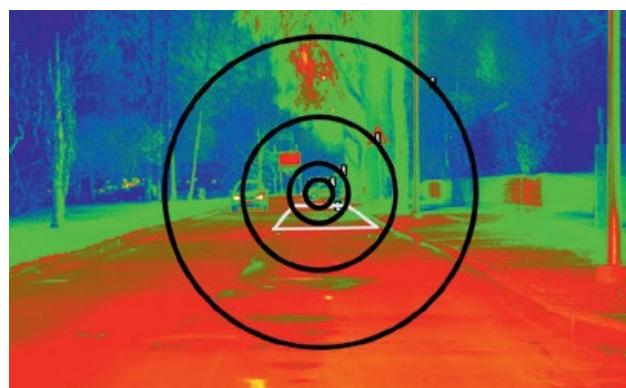
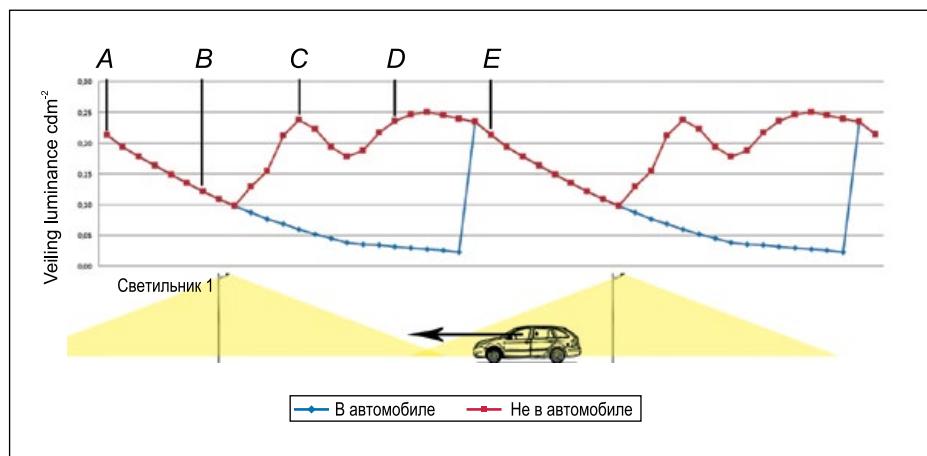


Рис. 4. Яркостное изображение улицы *Munkkiniemetranta*, на котором показаны круговые поля адаптации с угловыми размерами 0, 2, 5 и 10° и поверхность дороги между двумя соседними светильниками опорами. Яркостное изображение было получено для точки измерения *D*

Рис. 5.
Повторяющаяся последовательность точек расчёта вуалирующей яркости и рассчитанные для этих точек значения вуалирующей яркости. На красном графике (не в автомобиле) приведены значения вуалирующей яркости в случае неэкранированного поля зрения. На синем графике (в автомобиле) приведены значения вуалирующей яркости в случае, когда экранирующая плоскость расположена под углом 20° к горизонту



каждыми из соседних точек A, B, C, D и E. Соответственно, общее количество точек, применительно к которым рассчитывались значения вуалирующей яркости, было равно 25, а расстояние между двумя расчётными точками – 1,25 м.

Вуалирующую яркость рассчитывали в два этапа. Вначале в предположении, что поле зрения ничем не экранировано. Затем в предположении, что экранируется всё, что расположено выше 20° над линией зрения наблюдателя. 20° были выбраны как предположительный угол экранирования крышей автомобиля, если в качестве наблюдателя рассматривать водителя. Кроме того, расположенная под углом 20° к горизонту экранирующая плоскость использовалась в европейском стандарте [3]. Если экранирующая плоскость расположена под углом 20° к горизонту, то наблюдатель не видит все светильники, находящиеся от него на расстоянии менее 18,9 м. На рис. 5 проиллюстрировано повторяющееся расположение точек расчёта вуалирующей яркости и приведены рассчитанные для обоих вариантов значения вуалирующей яркости. На рис. 6 показан угол экранирования между горизонтальной линией фиксации взгляда и крышей автомобиля.

2.3. Преобразование в значения, соответствующие условиям сумеречного зрения

Измеренные значения яркости в условиях дневного зрения были преобразованы в значения, соответствующие условиям сумеречного зрения, при помощи описанной в CIE191:2010 системы фотометрии в условиях сумеречного зрения [1]. Эта система основана на следующих уравнениях:

$$M(m) \cdot V_{mes}(\lambda) = m \cdot V(\lambda) + (1 - m) \cdot V'(\lambda), \quad (2)$$

$$L_{mes} = \frac{683}{V_{mes}(\lambda_0)} \cdot \int_0^\infty V_{mes}(\lambda) \cdot L_e(\lambda) \cdot d\lambda, \quad (3)$$

где m – коэффициент, значение которого зависит от адаптации, $M(m)$ – нормализующая функция, такая, что максимальное значение $V_{mes}(\lambda)$ становится равным 1, $V_{mes}(\lambda_0)$ – значение $V_{mes}(\lambda)$ при $\lambda = 555$ нм, L_{mes} – яркость в условиях сумеречного зрения, $L_e(\lambda)$ – спектральная плотность энергетической яркости в $\text{Bt}/(\text{m}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{нм})$.

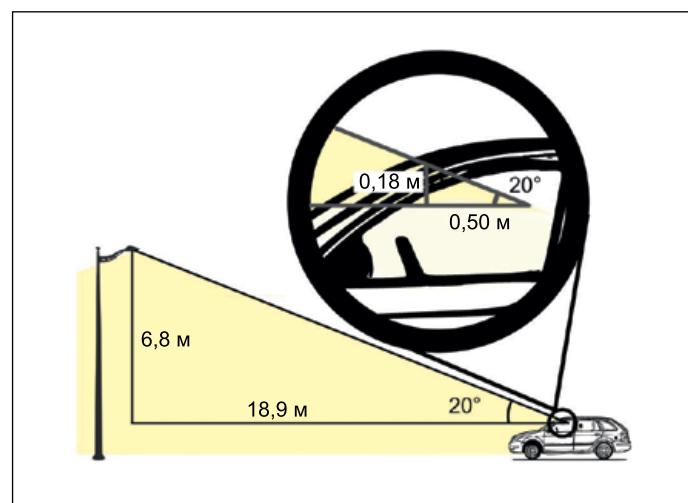


Рис. 6. Экранирующая плоскость, расположенная под углом 20° к горизонту. Наблюдатель не видит светильники, находящиеся от него на расстоянии менее 18,9 м

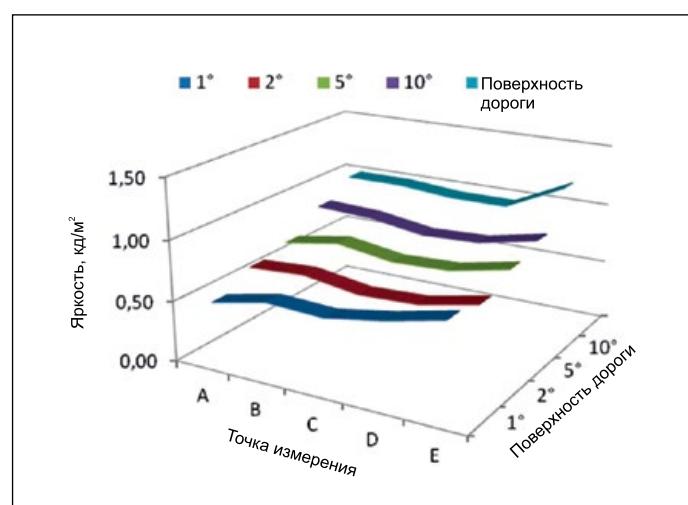


Рис. 7. Средние яркости круговых полей адаптации с угловыми размерами 0, 2, 5 и 10° и поверхности дороги в точках измерения A, B, C, D и E. Светильники работали в режиме 100% светового потока

Если $L_{mes} \geq 5 \text{ кд}/\text{м}^2$, то $m = 1$, а если $L_{mes} \leq 0,005 \text{ кд}/\text{м}^2$, то $m = 0$. Коэффициент m и яркость в условиях сумеречного зрения L_{mes} можно рассчитать методом последовательных приближений:

Таблица 1

Средние яркости круговых полей адаптации с угловыми размерами 0, 2, 5 и 10° и поверхности дороги в точках измерения A, B, C, D и E, а также средние значения и относительные среднеквадратичные отклонения яркости (σ) в точках измерения при использовании разных полей адаптации. И наоборот, средние значения и относительные среднеквадратичные отклонения яркости (σ) для каждого из полей адаптации при проведении измерений в пяти точках. Светильники работали в режиме 100% светового потока

100%-световой поток	A	B	C	D	E	Среднее	Относительное значение σ , %
1°, кд/м ²	0,49	0,59	0,57	0,65	0,76	0,61	16
2°, кд/м ²	0,62	0,65	0,58	0,60	0,70	0,63	7
5°, кд/м ²	0,68	0,76	0,69	0,71	0,81	0,73	7
10°, кд/м ²	0,86	0,84	0,77	0,79	0,89	0,83	6
Поверхность дороги, кд/м ²	1,00	1,00	0,96	0,96	1,19	1,02	9
Среднее, кд/м ²	0,73	0,77	0,71	0,74	0,87	0,76	
Относительное значение σ , %	28	21	22	19	22		

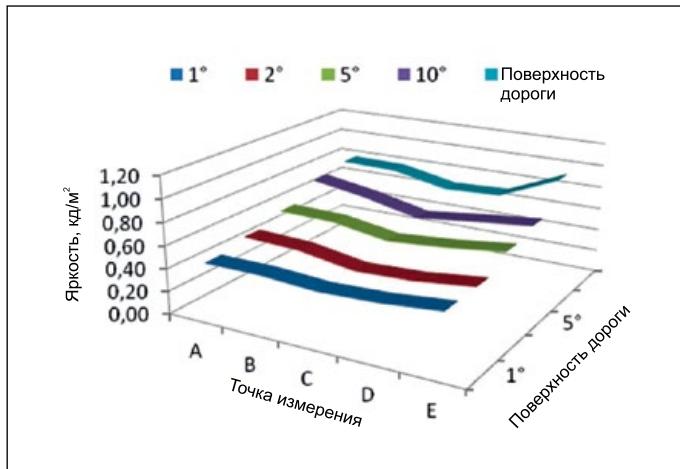


Рис. 8. Средние яркости круговых полей адаптации с угловыми размерами 0, 2, 5 и 10° и поверхности дороги в точках измерения A, B, C, D и E. Светильники работали в режиме 70% светового потока

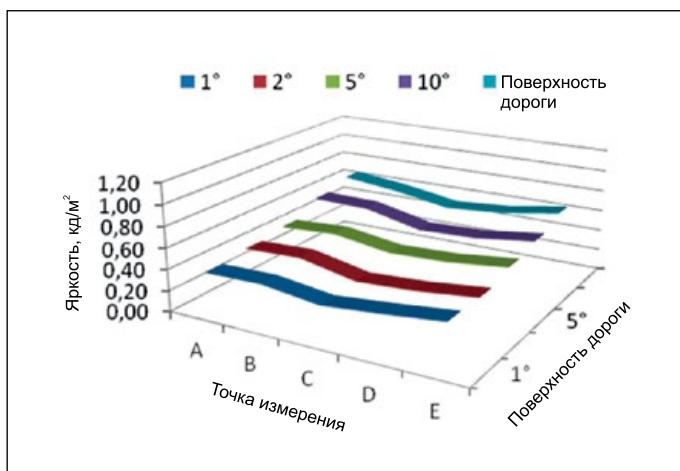


Рис. 9. Средние яркости круговых полей адаптации с угловыми размерами 0, 2, 5 и 10° и поверхности дороги в точках измерения A, B, C, D и E. Светильники работали в режиме 50% светового потока

$$m_0 = 0,5,$$

$$L_{mes,n} = \frac{m_{n-1} \cdot L_p + (1-m_{n-1}) \cdot L_S \cdot V'(\lambda_0)}{m_{n-1} + (1-m_{n-1}) \cdot V'(\lambda_0)}, \quad (4)$$

$$m_n = a + b \cdot \log_{10} \left(\frac{L_{mes,n}}{L_0} \right), \quad (5)$$

где L_p – яркость поля зрительной адаптации в условиях дневного зрения, L_S – яркость поля зрительной адаптации в условиях ночного зрения, $L_0 = 1$ кд/м², $V'(\lambda_0) = 683/1699$ – значение относительной спектральной световой эффективности в условиях ночного зрения при $\lambda = \lambda_0 = 555$ нм, a и b – параметры, равные 0,7670 и 0,3334 соответственно, n – номер итерации [1].

3. Результаты

Средние яркости круговых полей адаптации с угловыми размерами 1, 2, 5 и 10° и поверхности дороги были измерены в точках A, B, C, D и E. Измерения проведены при 100, 70 и 50% от максимального светового потока светильников. Вуалирующие яркости рассчитаны для 25 точек в соответствии с рис. 5 только для 100% уровня светового потока. Расчёты уровня адаптации выполнены только применительно к 5° круговому полю адаптации. Изменение продольного положения наблюдателя слабо влияло на различия в результатах, полученных для разных размеров поля адаптации. Поэтому проведение расчётов уровня адаптации применительно к другим полям адаптации было бы лишним. Для получения яркости, соответствующей уровню адаптации, к средней яркости 5° кругового поля адаптации была прибавлена вуалирующая яркость. И наконец, применительно к 5°-круговому полю адаптации проведено преобразование полученных результатов в данные, соответствующие условиям сумеречного зрения, после чего проведена оценка влияния вуалирующей яркости и положения наблюдателя.

Таблица 2

Средние яркости круговых полей адаптации с угловыми размерами 0, 2, 5 и 10° и поверхности дороги в точках измерения A, B, C, D и E, а также средние значения и относительные среднеквадратичные отклонения яркости (σ) в точках измерения при использовании разных полей адаптации. И наоборот, средние значения и относительные среднеквадратичные отклонения яркости (σ) для каждого из полей адаптации при проведении измерений в пяти точках.

Светильники работали в режиме 70% светового потока

70% световой поток	A	B	C	D	E	Среднее	Относительное значение σ , %
1°, кд/м ²	0,45	0,45	0,42	0,44	0,49	0,45	6
2°, кд/м ²	0,51	0,49	0,41	0,43	0,49	0,47	9
5°, кд/м ²	0,59	0,58	0,50	0,54	0,60	0,56	7
10°, кд/м ²	0,74	0,66	0,55	0,61	0,66	0,64	11
Поверхность дороги, кд/м ²	0,79	0,78	0,68	0,70	0,92	0,77	12
Среднее, кд/м ²	0,62	0,59	0,51	0,54	0,63	0,58	
Относительное значение σ , %	24	22	22	21	28		

Таблица 3

Средние яркости круговых полей адаптации с угловыми размерами 0, 2, 5 и 10° и поверхности дороги в точках измерения A, B, C, D и E, а также средние значения и относительные среднеквадратичные отклонения яркости (σ) в точках измерения при использовании разных полей адаптации. И наоборот, средние значения и относительные среднеквадратичные отклонения яркости (σ) для каждого из полей адаптации при проведении измерений в пяти точках.

Светильники работали в режиме 50% светового потока

70% световой поток	A	B	C	D	E	Среднее	Относительное значение σ , %
1°, кд/м ²	0,37	0,38	0,31	0,36	0,42	0,37	11
2°, кд/м ²	0,41	0,43	0,32	0,35	0,41	0,38	12
5°, кд/м ²	0,45	0,48	0,40	0,42	0,48	0,45	8
10°, кд/м ²	0,58	0,57	0,45	0,47	0,54	0,52	11
Поверхность дороги, кд/м ²	0,66	0,60	0,51	0,55	0,64	0,59	11
Среднее, кд/м ²	0,49	0,49	0,40	0,43	0,50	0,46	
Относительное значение σ , %	25	19	21	19	19		

3.1. Поля зрительной адаптации

На рис. 7–9 и в табл. 1–3 приведены средние яркости полей адаптации при работе светильников в режимах 100, 70 и 50%. Кроме того, в табл. 1–3 приведены средние значения и относительные среднеквадратичные отклонения, полученные применительно к совокупности точек измерения и полей адаптации.

Средние яркости, полученные для разных полей адаптации, отличались друг от друга умеренно. Средние значения относительного среднеквадратичного отклонения, рассчитанные применительно к совокупности полей адаптации, оказались равными 22, 23 и 21% для 100-, 70- и 50% уровней светового потока соответственно. Данные, полученные применительно к разным круговым полям адаптации, различались очень мало. Средняя яркость поверхности дороги всё время была несколько выше, чем средние яркости больших круговых полей адаптации. Кроме того, средние яркости круго-

вых полей адаптации были выше, чем средние яркости круговых полей адаптации меньших размеров. Вероятнее всего, причиной этого систематического увеличения яркости был ближний свет фар использовавшегося при проведении измерений автомобиля. Эти фары освещали главным образом поверхность дороги, а не окружающее пространство. Чем больше был относительный размер близкого к наблюдателю участка дороги, тем больше была и средняя яркость поля адаптации.

Продольное положение наблюдателя очень слабо влияло на среднюю яркость поля адаптации. Средние значения относительного среднеквадратичного отклонения, рассчитанные применительно ко всем точкам измерения, оказались равными 9, 9 и 11% для 100, 70 и 50% уровней светового потока соответственно. Точкам измерения C и D почти при всех уровнях светового потока и полях адаптации соответствовали наименьшие значения яркости. Однако эта тенденция была незначительной и, возможно, чисто случайной.

Таблица 4

Расчётные значения вуалирующей яркости в 25 точках измерения при нахождении наблюдателя «в автомобиле» и «не в автомобиле». Если наблюдатель находится «не в автомобиле», то в поле зрения попадают все объекты. Если наблюдатель находится «в автомобиле», то в поле зрения не попадают источники света, расположенные под углами более 20° над линией горизонта наблюдателя. Приведены расстояния между наблюдателем и ближайшей осветительной опорой по правую сторону от наблюдателя

	<i>A</i>						<i>B</i>		Опора				
Расстояние, м	20	21,25	22,5	23,75	25	26,25	27,5	28,75	0	1,25	2,5	3,75	
В автомобиле, кд/м ²	0,21	0,19	0,18	0,16	0,15	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	
Не в автомобиле, кд/м ²	0,21	0,19	0,18	0,16	0,15	0,14	0,12	0,11	0,10	0,13	0,15	0,21	
	<i>C</i>						<i>D</i>						<i>E</i>
Расстояние, м	5	6,25	7,5	8,75	10	11,25	12,5	13,75	15	16,25	17,5	18,75	20
В автомобиле, кд/м ²	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,23	0,21
Не в автомобиле, кд/м ²	0,24	0,22	0,19	0,18	0,19	0,22	0,24	0,25	0,25	0,25	0,24	0,23	0,21

3.2. Вуалирующая яркость

В табл. 4 приведены результаты расчётов вуалирующей яркости, а в табл. 5 – результаты статистического анализа полученных данных. Расчётные точки и соответствующие им значения яркости показаны на рис. 5.

Вуалирующая яркость сильно зависит от положения наблюдателя. В предельном случае, вуалирующая яркость увеличилась на более чем 900% при изменении положения наблюдателя на 1,25 м. Это имело место, когда наблюдатель считался сидящим в автомобиле и источники света, которые находились выше, чем под углом 20° к горизонтальной линии зрения наблюдателя, в рассмотрении не участвовали. При неэкранированном поле зрения изменения не столь впечатляющие, как при нахождении наблюдателя в автомобиле. Тем не менее при неэкранированном поле зрения отношение максимального значения вуалирующей яркости к её минимальному значению оказалось равным 2,61.

3.3. Яркость адаптации

В данной работе считалось, что яркость адаптации отражает состояние адаптации сетчатки. При этом также считалось, что она равна сумме средней яркости поля адаптации и вуалирующей яркости. Кроме того, яркость адаптации определяет собой спектральную чувствительность сетчатки. В данной работе считалось, что в пределах поля зрения участок измерения и поле адаптации совпадают. Для определения яркости адаптации, яркость участка измерения в условиях дневного зрения следует преобразовать в его яркость в условиях сумеречного зрения. На рис. 10 про-

Таблица 5

Средние, минимальные и максимальные расчёты значения вуалирующей яркости, отношения максимальной яркости к минимальной, среднеквадратичные отклонения и относительные среднеквадратичные отклонения

	В автомобиле	Не в автомобиле
Среднее, кд/м ²	0,09	0,18
Минимум, кд/м ²	0,02	0,09
Максимум, кд/м ²	0,22	0,24
Максимум/минимум	10,29	2,61
σ , кд/м ²	0,07	0,05
Относительное значение σ , %	71	25

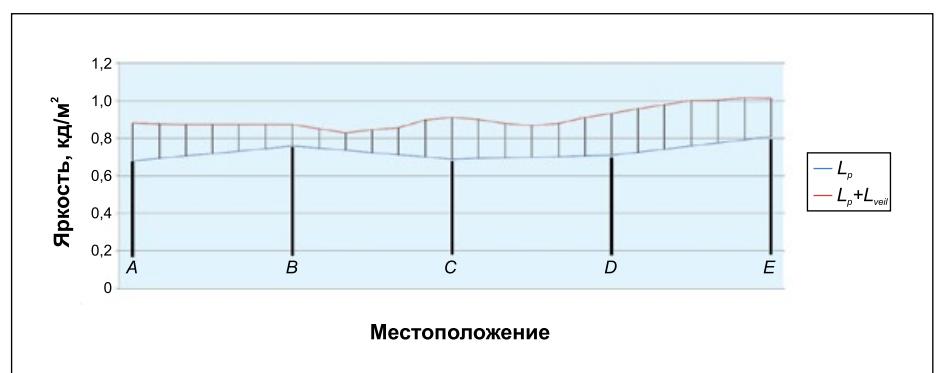


Рис. 10. Увеличение яркости адаптации, вызванное наличием вуалирующей яркости. На синем графике приведены средние значения яркости поля адаптации. На красном графике (не в автомобиле) приведены значения яркости адаптации. А, В, С, Д и Е – точки измерения

Таблица 6

Яркость в условиях сумеречного зрения L_{mes} , яркость в условиях сумеречного зрения при наличии вуалирующей яркости $L_{mes,true}$ и их относительная разность. Расчёты проводились с использованием 25 расчётных точек

Расположение, м	<i>A</i>	<i>A+1,25</i>	<i>A+2,5</i>	<i>A+3,75</i>	<i>A+5</i>	<i>A+6,25</i>	<i>B</i>	<i>B+1,25</i>	<i>B+2,5</i>	<i>B+3,75</i>	<i>B+5</i>	<i>B+6,25</i>	
L_{mes} , кд/м ²	0,7205	0,7342	0,7478	0,7615	0,7751	0,7887	0,8023	0,7904	0,7785	0,7666	0,7546	0,7427	
$L_{mes,true}$, кд/м ²	0,7156	0,7297	0,7438	0,7579	0,7719	0,7859	0,8000	0,7884	0,7768	0,7640	0,7514	0,7379	
Разность, %	-0,69%	-0,61%	-0,53%	-0,47%	-0,41%	-0,35%	-0,29%	-0,25%	-0,22%	-0,34%	-0,43%	-0,65%	
Расположение, м	<i>C</i>	<i>C+1,25</i>	<i>C+2,5</i>	<i>C+3,75</i>	<i>C+5</i>	<i>C+6,25</i>	<i>D</i>	<i>D+1,25</i>	<i>D+2,5</i>	<i>D+3,75</i>	<i>D+5</i>	<i>D+6,25</i>	<i>E</i>
L_{mes} , кд/м ²	0,7308	0,7342	0,7376	0,7410	0,7444	0,7478	0,7512	0,7683	0,7853	0,8023	0,8193	0,8363	0,8533
$L_{mes,true}$, кд/м ²	0,7253	0,7290	0,7332	0,7370	0,7402	0,7428	0,7457	0,7625	0,7794	0,7963	0,8138	0,8309	0,8485
Разность, %	-0,75	-0,70	-0,60	-0,54	-0,57	-0,67	-0,73	-0,75	-0,74	-0,75	-0,68	-0,64	-0,57

демонстрировано обусловленное вуалирующей яркостью увеличение яркости адаптации наблюдателя, который находится не в автомобиле. Ситуация «не в автомобиле» была выбрана потому, что в этом случае влияние вуалирующей яркости проявляется сильнее. Поэтому можно утверждать, что при нахождении наблюдателя в автомобиле влияние вуалирующей яркости окажется таким же или меньшим по сравнению с полученным в данной работе. Значения средней яркости, соответствующие полям адаптации между точками *A*, *B*, *C*, *D* и *E*, были получены посредством линейной интерполяции. В среднем, вуалирующая яркость увеличивала яркость адаптации на 25%.

3.4. Яркость в условиях сумеречного зрения

Вуалирующая яркость увеличивает уровень адаптации. Так, если уровень адаптации находится в пределах сумеречной области, то вуалирующая яркость смещает спектральную чувствительность в сторону дневного зрения. Естественно, вуалирующая яркость не приводит к увеличению яркости участка измерения. И если не учитывать вуалирующую яркость, то рассчитанная яркость участка измерения в условиях сумеречного зрения не соответствует действительности. В данной работе считалось, что в пределах поля зрения участок измерения и поле адаптации совпадают. Кроме того, приведённые ниже значения яркости в условиях сумеречного зрения получены только с использованием 5°-кругового поля адаптации. Повторение расчётов для других полей адаптации было сочтено лишним.

Использовавшийся в работе [9] метод последовательных приближений был применён для выявления влияния вуалирующей яркости на преобразование полученных данных в значения яркости соответствующие условиям сумеречного зрения. Истинные значения яркости в условиях сумеречного зрения $L_{mes,true}$, лежащие в интервале между измеренным значением яркости в условиях дневного зрения L_p и рассчитанным первоначально значе-

нием яркости в условиях сумеречного зрения L_{mes} , были получены посредством описываемого уравнениями (4) и (5) метода последовательных приближений, в котором используется десятичный логарифм, более точный, чем, например, линейная интерполяция. Этот метод реализуется следующим образом [9]:

1. Вначале среднюю яркость поля адаптации L_p при помощи уравнений (2) – (5) преобразуют в яркость в условиях сумеречного зрения L_{mes} .

2. Затем определяют $L_{mes,true}$, для чего вначале определяют уровень адаптации, прибавляя к рассчитанному значению вуалирующей яркости среднюю яркость поля адаптации. Полученный результат при помощи уравнений (2)–(5) преобразуют в яркость в условиях сумеречного зрения. В результате этих расчётов после 20 итераций получают значение m_{n-1} . Затем это значение используется в качестве «коэффициента интерполяции» при расчёте $L_{mes,true}$. Теперь значение $L_{mes,true}$ можно определить при помощи однократного применения уравнения (4) (а не методом последовательных приближений), в котором в качестве яркости поля адаптации выступает яркость в условиях дневного зрения L_p , а в качестве «коэффициента интерполяции» – параметр m_{n-1} .

3. И наконец, рассчитывают соотношение L_{mes} и $L_{mes,true}$.

Результаты применения описанного процесса приведены в табл. 6. Обусловленная наличием вуалирующей яркости средняя относительная разность значений $L_{mes,true}$ и L_{mes} составила -0,56%. Это можно считать очень малым различием. Рассчитанное применительно к $L_{mes,true}$ значение относительного среднеквадратичного отклонения оказалось равным 4,4%.

4. Выводы

Измеренное значение яркости в условиях сумеречного зрения изменялось в зависимости от положения наблюдателя. Целями данной работы были идентификация и ко-

личественное описание этого изменения. Поэтому значения яркости в условиях сумеречного зрения измерены применительно к нескольким продольным положениям наблюдателя на дороге, после чего проанализированы полученные результаты.

Средняя яркость поля адаптации измерена в пяти следующих друг за другом точках. Расстояние между двумя соседними точками равно 7,5 м. В качестве полей адаптации использованы круговые поля размером 1, 2, 5 и 10° и поверхность дороги между двумя соседними светильниками. Измерения проведены при 100, 70 и 50% от максимального светового потока светильников. Среднее значение относительного среднеквадратичного отклонения, рассчитанное применительно к совокупности полей адаптации, оказалось равным 22%. При этом зависимость от продольного положения наблюдателя оказалась одинаковой для всех полей адаптации, а уровень создаваемого осветительной установкой светового потока не оказывал существенного влияния на эту зависимость. Так что во избежание повторений анализ проведён только применительно к 100% уровню светового потока и 5°-круговому полулю адаптации. При этих значениях параметров (100% и 5°) среднее значение относительного среднеквадратичного отклонения, рассчитанное применительно к средним значениям яркости, измеренным в пяти точках (*A*, *B*, *C*, *D* и *E*), оказалось равным 7%.

Наличие вуалирующей яркости приводит к увеличению яркости адаптации, но не к увеличению яркости участка измерения. Так что вуалирующую яркость следует учитывать при преобразовании яркости участка измерения в яркость в условиях сумеречного зрения. Среднее значение относительного среднеквадратичного отклонения, рассчитанное применительно к совокупности значений вуалирующей яркости, оказалось равным 71%, если наблюдатель находился в автомобиле, и 25%, если – не в автомобиле. Кроме того, исходя из значений яркости адаптации, мы определили яркости участков измерения в условиях сумеречного зрения. Обусловленные влиянием вуалирующей яркости изменения яркости в условиях сумеречного зрения, в среднем составили всего –0,56%.

Относительное среднеквадратичное отклонение значений яркости в условиях сумеречного зрения, полученных при разных положениях наблюдателя, оказалось равным 4,4%. Теоретически, продольное положение наблюдателя является существенным. Однако при осуществляемых на практике измерениях параметров дорожного освещения влияние продольного положения наблюдателя можно считать небольшим.

Авторы благодарят Программу университета Аалто в области энергоэффективности (проект *Light Energy – Efficient and Safe Traffic Environments*) за финансирование данной работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. CIE191:2010. Recommended system for mesopic photometry based on visual performance. Vienna, CIE, 2010.
2. Holladay, L. L. The fundamentals of glare and visibility// Journal of the Optical society of America and review of scientific instruments. –1926. – Vol. 12, No. 4. – P. 271–319.
3. EN13201–3. Road lighting – Part 3: Calculation of performance. European Standard, CEN, Brussels, 2004.
4. CEN/TR13201–1. Road lighting – Part 1: Selection of lighting classes. Technical Report, CEN, Brussels, 2004.
5. Cengiz, C., Kotkanen, H., Puolakka, M., Lappi, O., Lehtonen, E., Halonen, L., Summala, H. Combined eye-tracking and luminance measurements while driving on a rural road: Towards determining mesopic adaptation luminance// Lighting Research and Technology. – 2013. – Vol. 0. – P. 1–19.
6. Winter, J., Völker, S. Typical eye fixation areas of car drivers in innercity environments at night. Lux Europa 2013, 12th European Lighting Conference, Krakow, 2013.
7. CIE140:2000. Technical report, Road lighting calculations. ISBN3901906541. 2000.
8. CIE146:2002. CIE equations for disability glare. ISBN9783901906152, 2002.
9. Maksimainen, M., Puolakka, M., Tetri, E., Halonen, L. Veiling luminance and visual adaptation field in mesopic photometry// Lighting Research and Technology, 2016 (в печати).



Микко Максимайнен (Mikko Maksimainen), M. Sc. Аспирант Университета Аалто. Область научных интересов: наружное освещение, фотометрия в условиях сумеречного зрения, зрительная адаптация



Марьюкка Пуолакка (Marjukka Puolakka), Dr. Sc. Внештатный журналист с большим опытом научной работы. Имеет более чем двадцатилетний опыт научных исследований. Область научных интересов: светотехника, эргономические характеристики освещения, наружное и транспортное освещение, инженерное оборудование зданий и «умные» дома. Автор более 130 научных работ



Эйно Тетри (Eino Tetri), Dr. Sc. Окончил Хельсинский технический университет (2001 г.). Руководитель группы светотехнического блока Университета Аалто по исследованиям источников света и энергоэффективных систем освещения



Лииза Халонен (Liisa Halonen), Dr. Sc. (1993 г.), проф. Возглавляет светотехнический блок Университета Аалто. Отвечает за обучение аспирантов и исследования в области светотехники. Координировала ряд национальных и международных исследовательских проектов