

Освещение тоннелей светильниками с мощными светодиодами на примере городского автодорожного тоннеля в г. Стамбуле

К. КАРАТЕКИН

Стамбульский технический университет, г. Стамбул, Турция
E-mail: karatekin@itu.edu.tr

Аннотация

В рамках данного исследования проведено проектирование установки со светильниками с мощными светодиодами (СД), предназначенной для освещения городского автодорожного тоннеля. Автоматизированная осветительная установка (ОУ) с СД обеспечивает ступенчатое изменение яркости дорожного покрытия. Проведённые исследования показали, что проект ОУ с СД обеспечивает уровни яркости, удовлетворяющие требованиям *СIE088:2004*.

Сравнительное исследование энергоэффективности ОУ с натриевыми лампами высокого давления (НЛВД) и ОУ с СД применительно к освещению автодорожных тоннелей было проведено на примере городского тоннеля в Стамбуле. Установлено, что светильники с СД обеспечивают 45,5 % экономию энергии по сравнению с НЛВД.

Ключевые слова: освещение автодорожных тоннелей, светильники с мощными СД, натриевые лампы высокого давления, энергоэффективность.

1. Введение

Тоннели часто используются на городских и междугородних автодорогах, так как они позволяют сократить путь и облегчают движение транспорта. Глаза водителей, адаптированные к окружающей среде и яркому дневному свету, воспринимают въезд в тоннель как тёмное отверстие и поэтому не способны полноценно видеть объекты на въезде в тоннель [1]. В то же время, ночью этой проблемы не существует, т.к. глаза уже адаптированы к темноте. Поэтому освещение тоннелей особенно важно в дневное время, когда следует принимать определённые предупредительные

меры, обеспечивающие зрительную адаптацию водителей к тёмному тоннелю. Это в первую очередь относится к въездной зоне тоннеля. Освещение тоннелей должно обеспечивать необходимый минимальный уровень яркости, необходимый водителям для безопасного и комфортного движения на всём протяжении тоннеля. Требования безопасности, связанные с движением в тоннелях, были сформулированы в руководстве Международной комиссии по освещению (МКО) [2] и учитывались при проведении данного исследования.

В этой работе была для освещения городского тоннеля спроектирована осветительная установка (ОУ) со ступенчатым изменением яркости, в которой использовались светильники со светодиодами (СД), предназначенные для освещения тоннелей. В настоящее время в тоннеле работает ОУ с натриевыми лампами высокого давления (НЛВД). В этой работе исследуется изменение энергоэффективности при замене светильников с НЛВД на светильники с СД.

Согласно отчёту, опубликованному Министерством энергетики США, замена используемых в настоящее время источников света на СД позволит США за ближайшие 20 лет сэкономить на электроэнергии \$250 млрд, на 50 % уменьшит расходующую на освещение энергию и на 1800 млн тонн – выбросы CO_2 [3].

Использование белых СД в ОУ предпочтительнее использования традиционных источников света по многим причинам, таким как их более высокая световая отдача, больший срок службы и, тем самым, меньшая потребность в техническом обслуживании, а также меньшие размеры оборудования, большие гибкость и возможность управления уровнем и цветом освещения и низкое энергопотребление [4]. На освещение прихо-

дится 20 % от общего мирового потребления энергии [5]. Использование СД позволит уменьшить это число на 4 % или даже больше. Ожидается, что за ближайшие десять лет СД станут основным источником света, и от обусловленного этим уменьшения энергопотребления и выброса парниковых газов выиграют все, включая потребителей, которые ежегодно будут экономить сотни долларов на плате за электроэнергию. Светильник с СД *Tunnel Pass LED* уменьшает потребление энергии по сравнению со светильниками с НЛВД на вплоть до 50 % и обеспечивает оптимальную равномерность освещения тоннелей и подземных переходов, имея при этом срок службы до 100000 ч.

Большая часть подводимой к кристаллам мощных СД энергии преобразуется в тепло, которое необходимо отводить от СД, тогда как оставшаяся часть энергии преобразуется в свет [6]. В результате рабочая температура СД является одним из самых существенных факторов, влияющих на надёжность и долговечность СД. Продолжительная работа СД при повышенных температурах ускоряет спад светового потока, тем самым уменьшая срок службы СД. И т.к. выработываемое тепло является чрезвычайно важно проблемой для светильников с мощными СД, то это тепло следует отводить при помощи соответствующих методов.

В тоннелях используются НЛВД, люминесцентные лампы и металлогалогенные лампы. Замена в железнодорожных тоннелях светильников с люминесцентными лампами на светильники СД привело к экономии энергии и облегчению технического обслуживания [7]. В другом исследовании было проведено сравнение работы разных светильников, таких как светильники с люминесцентными лампами, НЛВД и металлогалогенными лампами, при разных высотах подвеса, соответствующих их использованию в подводных и иных тоннелях [8, 8a].

Устройства управления СД позволяют осуществлять светорегулирование, что даёт пользователям возможность устанавливать желаемую величину светового потока. Имеются серии светильников с возможностью выбора светового потока, что позволяет обеспечить максимальную экономию энергии. Так светильники

Таблица 1

Диаметры окружностей зон поля адаптации

Угол α , град.	РБТ, м	Диаметр D , м
2	75	2,62
3	75	3,93
4	75	5,24
5,8	75	7,60
8	75	10,49
11,6	75	15,24
16,6	75	21,88
24	75	31,88
36	75	48,74
56,8	75	81,10

Tunnel Pass LED могут быть как потолочными, так и настенными, и предназначены для замены светильников с НЛВД мощностью 100 и 400 Вт. В данном исследовании было проведено сравнение энергоэффективности светильников с НЛВД мощностью 150 и 400 Вт и светильников с СД. В пороговой зоне тоннеля использовалась система встречного освещения, тогда как в остальных зонах использовалась система симметричного освещения. Из соображений безопасности автоматизированная ОУ проектировалась при условии исключения блёскости при въезде в тоннель.

2. Определение входных параметров для проектирования

Проектирование освещения тоннеля осуществлялось при помощи разработанной компанией *Schreder Company* программы *Tunnel v3* [9], позволяющей производить расчёты, проектировать и составлять отчёты в соответствии с рекомендациями [2]. В исследовании был рассмотрен расположенный в Стамбуле тоннель *Halit Ulukurt Tunnel*, который состоит из двух стволов. Первый ствол имеет длину 690 м, а второй — 720 м [10]. Полная ширина тоннеля равна 10 м, каждый ствол содержит две полосы движения шириной 3,75 м.

2.1. Расчёт расстояния безопасного торможения

Расстояние безопасного торможения (РБТ) — это расстояние, на кото-

ром водитель автомобиля, движущегося с постоянной скоростью, может безопасно остановиться при наличии препятствия перед ним [2]. Для расчёта РБТ требуется знание двух важных параметров:

- Проектная скорость движения в тоннеле.

- Наибольший проектный продольный уклон дороги в пределах тоннеля на въезде в тоннель и на выезде из тоннеля.

Расчёт РБТ производится по формуле (1). Первое слагаемое в правой части этого выражения представляет собой расстояние, пройденное за промежуток времени между моментом, в который водитель заметил находящееся перед ним препятствие, и моментом нажатия на тормоз. Второе слагаемое — это расстояние, пройденное автомобилем после начала торможения до его полной остановки.

$$\text{РБТ} = u \cdot t_0 + \frac{u^2}{2 \cdot g \cdot (f \pm s)}, \quad (1)$$

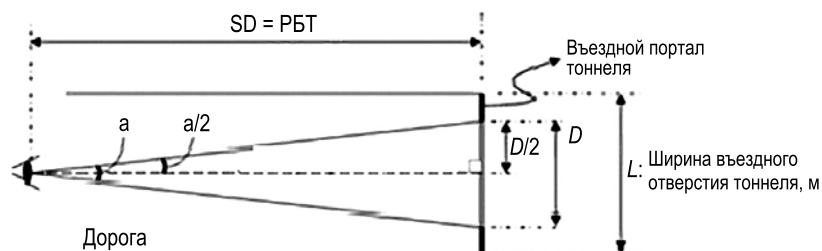


Рис. 1. Подъездная зона тоннеля, вид сверху

где u — проектная скорость движения в тоннеле, м/с, f — коэффициент трения, t_0 — время реакции, s — уклон дороги, g — ускорение свободного падения, м/с².

При расчётах РБТ использовались наиболее неблагоприятные значения уклона дороги ($s = 0,5\%$) и проектной скорости движения в тоннеле ($u = 70$ км/ч). Коэффициент трения считали равным 0,35, а время реакции — равным 1 с. При этом рассчитанное по формуле (1) значение РБТ равно:

$$\text{РБТ} = 75,25 \text{ м.} \quad (2)$$

2.2. Расчёт яркости пороговой зоны

В основе всех расчётов освещения тоннелей лежит яркость в пороговой зоне L_{TH} . Её значение рассчитывают предложенным в [2] методом воспринимаемого контраста. Этот метод предполагает нанесение концентрических окружностей на «специальную фотографию», которую делают из точки, отстоящей на РБТ от въездного портала тоннеля. Эти окружности отображают «поле зрения водителя», и применительно к ним осуществляются последующие оценки яркости. В рамках этого метода на специальную фотографию наносят 10 концентрических окружностей [2].

Окружности были нанесены графическими методами для углов $\alpha = 2; 3; 4; 5,8; 8; 11,6; 16,6; 24; 36$ и $56,8^\circ$ (рис. 1). В табл. 1 приведены диаметры наносимых окружностей, рассчитанные с учётом ширины въездного портала тоннеля и соответствующих значений углов (рис. 1).

На рис. 2 показаны нанесённые на фотографию окружности. Окружности были разделены на части 12 линиями, проходящими через центр окружностей и отстоящими друг от друга на 30° . Соответствующие этим частям значения воспринимаемой

Примеры значений яркости окружения портала тоннеля [2]

Направление движения (северное полушарие)	L_c (небо), ккд/м ²	L_r (дорога), ккд/м ²	L_e (окружение портала), ккд/м ²			
			Скалы	Здания	Снег	Растительность
С	8	3	3	8	15 (верт.) 15 (гор.)	2
В, 3	12	4	2	6	10 (верт.) 15 (гор.)	2
Ю	16	5	1	4	5 (верт.) 15 (гор.)	2

яркости были рассчитаны с использованием параметров, приведённых в табл. 2. Окружности были пронумерованы цифрами от 1 до 9, отсчитываемыми от центральной точки. 12 участков, на которые были разделены окружности, были пронумерованы цифрами от 1 до 12, отсчитываемыми от верхней точки по часовой стрелке.

Требуемое для проведения расчётов значение полной эквивалентной вуалирующей яркости L_{seq} зависит от яркостей всех этих участков, образованных 10-ю окружностями и отстоящими друг от друга на 30° радиальными линиями, за исключением двух наибольших и двух наименьших участков. Последнее обусловлено тем, что эти участки считали не попадающими в поле зрения. В результате получаем:

$$L_{seq} = 5,1 \cdot 10^{-4} \cdot \sum L_{ije}, \quad (3)$$

$$L_{ije} = \tau_{ws} \cdot L_{ij} + L_{ws}, \quad (4)$$

$$L_{TH} = \frac{L_m}{\frac{1}{c_m} \cdot \left(\frac{\rho}{\pi \cdot q_c} - 1 \right) - 1}, \quad (5)$$

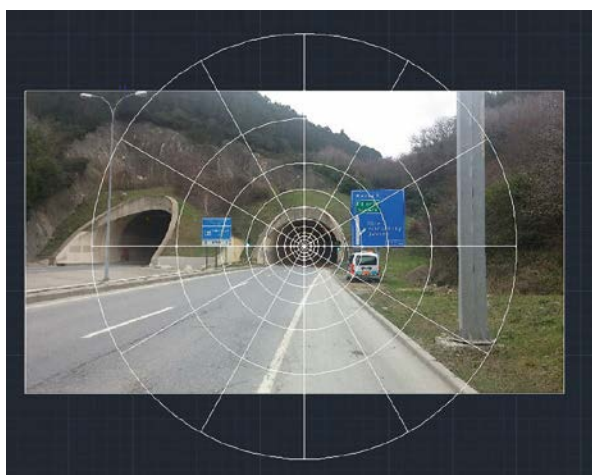
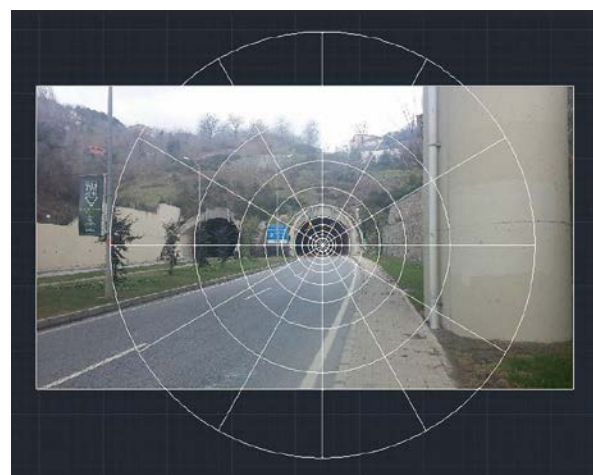
$$L_m = \frac{(\tau_{ws} \cdot L_{atm} + L_{ws} + L_{seq})}{\tau_{ws} \cdot \tau_{atm}}, \quad (6)$$

где L_{seq} – полная яркость эквивалентной вуали, ккд/м²; L_{ije} – яркости участков перед водителем, ккд/м²; L_{ij} – средняя яркость участка, измеренная перед лобовым стеклом за пределами автомобиля, ккд/м²; L_{ws} – «яркость поверхности» лобового стекла автомобиля, ккд/м²; L_m – полная яркость перед глазами водителя, ккд/м²; τ_{ws} – коэффициент пропускания лобового стекла автомобиля; ρ – коэффициент отражения; q_c – показатель обнаружения контраста; c_m – воспринимаемый контраст.

Если для какого-то участка измерения произвести не удалось, то использовались значения, приведённые в [2]. Коэффициент пропускания атмосферы считали равным $\tau_{atm} = 1$, коэффициент пропускания лобового стекла автомобиля – равным $\tau_{ws} = 0,8$, а коэффициент отражения опасного препятствия – равным $\rho = 0,2$. Показатель обнаружения контраста может быть равен как минимум 0,6 в случае системы встречного освещения и как максимум 0,2 в случае системы симметричного освещения. Яркости участков в поле адаптации приведены в табл. 2. Считается, что воспринимаемый контраст c_m является отрицательным, и его минимальное абсолютное значение равно 28 % [2]. В результате получаем:

$$L_{ije} = 146,58 \text{ ккд/м}^2, \quad (7)$$

$$L_{seq} = 74,756 \text{ ккд/м}^2. \quad (8)$$

Рис. 2. Окружности, нарисованные на фотографии въездного портала тоннеля *Istanbul Beykoz*Рис. 3. Окружности, нарисованные на фотографии въездного портала тоннеля *Istanbul Kavacik*

Значения яркостных параметров освещения внутренней зоны тоннеля в дневном режиме

Координаты положения условного наблюдателя (x, y, z), м	Яркостные параметры				
	Средняя яркость, кд/м ²	Мин. яркость /средн. яркость, %	Макс. яркость / средн. яркость, %	Мин. яркость, кд/м ²	Макс. яркость, кд/м ²
–60,00; 1,88; 1,50	3,48	69,06	50,78	2,4	4,73
–60,00; 5,63; 1,50	3,48	69,06	50,78	2,4	4,73

Таблица 4

Значение яркостных параметров освещения тоннеля в ночном режиме

Координаты положения условного наблюдателя (x, y, z), м	Яркостные параметры				
	Средняя яркость, кд/м ²	Мин. яркость /средн. яркость, %	Макс. яркость / средн. яркость, %	Мин. яркость, кд/м ²	Макс. яркость, кд/м ²
–60,00; 1,88; 1,50	1,74	69,06	50,78	1,2	3,37
–60,00; 5,63; 1,50	1,74	69,06	50,78	1,2	3,37

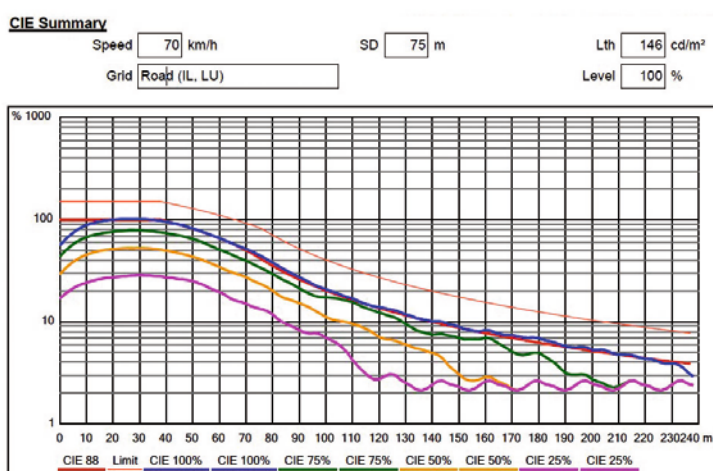


Рис. 4. Графики CIE088 для первого ствола тоннеля

$$L_m = 320,94 \text{ кд/м}^2, \quad (9)$$

$$L_{TH} = 146,4 \text{ кд/м}^2. \quad (10)$$

Итак, было установлено, что в случае тоннеля *Веукоз* яркость в пороговой зоне L_{TH} равна 146,4 кд/м². Однако для облегчения расчётов использовалось значение $L_{TH} \approx 146$ кд/м². Аналогичным образом, при расчётах, проводившихся применительно к тоннелю *Kavacik*, использовалось значение $L_{TH} \approx 133$ кд/м². Полученные в результате проведённых расчётов значения параметров приведены ниже:

L_{TH} : 146 кд/м² в случае тоннеля Веукоз (первый ствол).

L_{TH} : 133 кд/м² в случае тоннеля *Kavacik* (второй ствол).

$L_{\text{внутренней зоны}}$: 3,45 кд/м² (яркость во внутренней зоне тоннеля).

$L_{\text{ночью}}$: 1,74 кд/м² (яркость в случае ночного освещения).

2.3. Значения яркости при разных уровнях освещения

Осветительная установка была спроектирована таким образом, чтобы обеспечить ступенчатое изменение уровней яркости в тоннеле. В то же время, для создания наименьшего уровня яркости использовались наименее мощные светильники, что обеспечивало энергоэффективность

и возможность получения нужного значения яркости.

Спроектированная установка обеспечивала шесть режимов, удовлетворяющих требованиям [2]: 100, 75, 50 и 25 % для пороговой зоны, а также дневной для внутренней зоны и ночной для всего тоннеля. Соответствующие разным режимам значения яркости в пороговой зоне первого ствола рассматриваемого тоннеля были равны:

- режим 100 %: $L_{100\%} = 146$ кд/м²;
- режим 75 %: $L_{75\%} = 109,5$ кд/м²;
- режим 50 %: $L_{50\%} = 73$ кд/м²;
- режим 25 %: $L_{25\%} = 36,5$ кд/м²;
- дневной режим: $L_{\text{daytime}} = 3,45$ кд/м²;

- ночной режим: $L_{\text{night}} = 1,74$ кд/м².

Согласно [2], соответствующее дневному режиму для внутренней зоны значение яркости L_{daytime} должно быть равно 3,48 кд/м² (табл. 3), тогда как обеспечиваемая в этом случае яркость во внутренней зоне тоннеля оказалась равной 3,45 кд/м². Т.к. 3,48 больше, чем 3,45, то в соответствии с [2] для дневного режима можно выбрать именно его.

В результате проведённых расчётов была определена соответствующая ночному режиму яркость L_{night} , которая оказалась равной 1,74 кд/м², и это же значение содержится в табл. 4.

Соответствие всех яркостных режимов требованиям [2] было проверено при помощи графиков МКО (рис. 4 и 5). Приведённые в [2] графики обозначены красным цветом и отражают

Потребление энергии с учётом разных режимов работы [10]

Режим	Годовая продолжительность работы, ч	НЛВД		СДЛ	
		Мощность, Вт	Энергопотребление, кВт·ч	Мощность, Вт	Энергопотребление, кВт·ч
Ночной	8760	9399	82335	2925	25623
Дневной	4400	9399	41356	2925	12870
25 %	3500	8829	30902	7668	26838
50 %	2800	8828	24718	7542	21118
75 %	2000	8829	17658	8694	17388
100 %	1200	8828	10594	7716	9259
Всего			207563		113096

соответствующее идеальному проекту освещения распределение яркости на всём протяжении тоннеля. График предельных значений, имеющий оранжевый цвет, соответствует максимальным значениям яркости, которые не должны быть превышены ни на одном из участков. В дополнение к красному и оранжевому графикам, на рис 4 и 5 приведены графики для режимов 100, 75, 50 и 25 %, которые обозначены, соответственно, синим, зелёным, жёлтым и розовым цветом. Графики яркости, полученные в случае использования светильников с СД, приведены на рис. 4 и 5 для первого и второго ствола соответственно. В обоих случаях графики, соответствующие режиму 100 %, полностью повторяли графики яркости, приведённые в [2]. Было установлено, что в случаях как первого, так и второго ствола проект освещения и количества светильников удовлетворяли нормативным требованиям.

3. Сравнение светильников с мощными СД и светильников с НЛВД

Проект ОУ со светильниками с мощными СД был разработан при помощи программы *Tunnel v3*.

В результате расчётов было установлено, что в первом и втором стволе потребуются: светильники с СД мощностью 213 Вт и равным 700 мА номинальным током СД (140 и 128 шт. соответственно) и светильники с СД мощностью 75 Вт и равным 500 мА номинальным током СД (102 и 128 шт. соответственно). Энергопотребление светильников, в которых исполь-

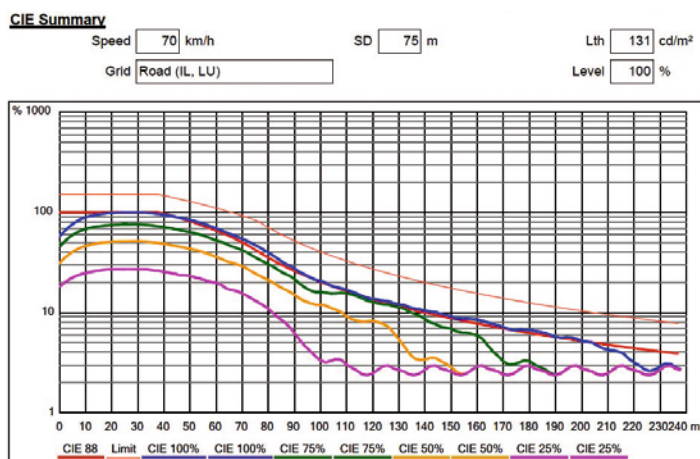


Рис. 5. Графики CIE088 для второго ствола тоннеля

зовались СД с номинальными токами 700 и 500 мА, были равны, соответственно, 213 и 75 Вт.

В рассматриваемом тоннеле в настоящее время используются светильники с НЛВД мощностью 400 и 150 Вт. Количество светильников с НЛВД мощностью 400 Вт равно 64 шт., а их энергопотребление с учётом пускорегулирующих аппаратов и зажигающих устройств составляет 434,5 Вт. С другой стороны, количество светильников с НЛВД мощностью 125 Вт равно 44 шт., а их энергопотребление с учётом пускорегулирующих аппаратов и зажигающих устройств составляет 170,6 Вт [10].

Сравнение годового потребления энергии ОУ с такими светильниками с СД и с НЛВД проведено в табл. 5. Данные об энергопотреблении в случае реального тоннеля были предоставлены Стамбульским управлением по эксплуатации тоннелей [10].

Рассчитанные на основе годовой продолжительности работы значения потребляемой энергии составили 207563 кВт·ч при использовании светильников с НЛВД, тогда как в случае светильников с СД эта величина оказалась равной 113096 кВт·ч. Из этого следует, что светильники с СД обеспечивают 45,5-процентную экономию энергии, а это значительная цифра, если учитывать, что большинство стран мира старается при помощи программ по повышению энергоэффективности по возможности максимально уменьшить количество потребляемой энергии.

Достигнутое в результате использования светильников с СД уменьшение энергопотребления в тоннеле на 45,5 % является достаточно большим, особенно если принимать во внимание важность энергосбережения для современного мира.

4. Заключение

В данном исследовании проведено проектирование допускающей ступенчатое изменение яркости ОУ со светильниками с мощными СД, предназначенной для освещения городского автодорожного тоннеля. Полученные в результате проектирования значения яркости совпадают с приведёнными в [2] графиками МКО. В результате проведённых исследований было установлено, что проект ОУ со светильниками с СД обеспечивает уровни яркости, нормированные в [2].

Расчётное значение РБТ оказалось равным 75,27 м, а значения яркости в пороговой зоне для первого и второго ствола тоннеля были равны, соответственно, 146 и 133 кд/м².

Рассмотренный в исследовании реальный тоннель освещается светильниками с НЛВД. Были проведены расчёты, позволяющие сравнить энергоэффективности ОУ с НЛВД и с СД.

Было установлено, что при замене используемых в настоящее время светильников с НЛВД на светильники с СД годовое потребление энергии уменьшится на 45,5 %. Т.к. большинство стран стараются найти новые способы уменьшения потребляемой ими энергии и выбросов CO₂, то обеспечиваемая светильниками с СД 45,5-процентная экономия энергии оказывается довольно существенной. Применительно к освещению тоннелей, светильники с СД являются реальной и удобной в эксплуатации альтернативой светильникам с другими источниками света, что обусловлено их большими сроками службы, лучшей цветопередачей и более высокой энергоэффективностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Simons, R.H., Bean, A.R.* Tunnel lighting. — In: *Lighting Engineering, Applied Calculations*, 2001, pp. 402–410.
2. CIE International Commission on Illumination Technical Report-88. Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses, 2004.
3. Energy Savings Potential of Solid-State Lighting in General Illumination Applications // Navigant Consulting Inc., U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Building Technologies Program, Washington, DC, 2012.
4. *Mottier, P.* LEDs for lighting applications. — New York: John Wiley & Sons, 2009.

5. *Lenk, R., Lenk, C.* Practical lighting design with LEDs. — New York: John Wiley & Sons, 2011.

6. *Ding, X., Li, Y., Li, Z., Tang, Y., Yu, B., Yuan, D.* Application of heat pipe heat sink for high power LED lamps // *Applied Mechanics and Materials*. — 2014. — Vols. 602–605. — P. 2713–2716.

7. *Leung, H.M.S.* LED lighting application in long railway tunnels // *The Hong Kong Institution of Engineers Transactions*. — 2012. — Vol.19, No.4. — P. 42–46.

8. *Cengiz, M.S., Rüstemli, S.* The relationship between height and efficiency and solution offerings in tunnel and sub-sea tunnels // *Light & Engineering*. — 2014. — Vol. 22, No. 2. V P. 76–83.

- 8а. *Рустемли С., Сенгиз М.С.* Оптимизация освещения тоннелей // *Светотехника*. — 2014. — № 4. — С. 64–69.

9. <http://www.schreder.com.eg/en-egs/LearningCentre/Dossiers/Pages/Optimum-safety-for-LED-tunnel-lighting-solutions.aspx>.

10. Istanbul Tunnel Management (IS-BAK). <http://tunel.isbak.com.tr/>.



Канак Каратекин (Kanak Karatekin), Dr.
(электротехника).
Окончила Стамбульский технический университет (1993 г.). Доцент Стамбульского технического университета.

КАДОШКИНСКИЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ ЗАВОД

ЛАМПА GALAD ДНаТ-600

PPF 1300 мкмоль/с
Высокий фотосинтезный фотонный поток

600Вт
Высокая эффективность

E40
Универсальный цоколь

Применение
Промышленные и селекционные теплицы, зимние сады, оранжереи

85 000 лм
Световой поток

Возможность диммирования

Технические параметры лампы:
Диаметр: 46 мм
Высота: 292 мм
Максимальная температура: 400° C max
Температура цоколя: 250° C max

ХАРАКТЕРИСТИКИ:

Тип колбы	T46
Мощность	600 Вт
Напряжение сети	400 В
Фотосинтезный фотонный поток PPF	1300 мкмоль/с
Фотосинтезная фотонная эффективность	2,15 мкмоль/Дж
Световой поток (100ч)	85 000 лм
Цветовая температура	2000 К
Индекс цветопередачи CRI	22
Повторное зажигание через	1-2 мин.
Срок службы	32 000 ч
Положение горения	произвольное



ООО «БЛ ТРЕЙД» — официальный дистрибьютор торговых марок GALAD и OPORA ENGINEERING www.bl-trade.ru

Россия, Республика Мордовия, п. Кадошкино, ул. Заводская, 1, тел: (83448) 2-31-21