

# Оценка жизненного цикла светильников для турецких дорог классов *M1* и *M2* по освещению<sup>1</sup>

Р. АЯЗ<sup>1,3</sup>, А.К. ОЗКАНЛИ<sup>1</sup>, И. НАКИР<sup>1</sup>, П. БХУСАЛ<sup>2</sup>, А. УНАЛ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Технический университет Илдиз, Стамбул, Турция

<sup>2</sup> Университет Аалто, Эспо, Финляндия

<sup>3</sup> E-mail: ayaz@yildiz.edu.tr

## Аннотация

В статье описаны исследование и сравнение фотометрических характеристик и затрат жизненного цикла светильников со светодиодами (СД) и традиционных светильников с натриевыми лампами высокого давления (НЛВД) и металлогалогенными лампами (МГЛ). Измерения фотометрических характеристик ламп и светильников выполнялись в светотехнической лаборатории Технического университета Илдиз, Турция. Эксплуатационные требования к светильникам устанавливались согласно стандартам Международной комиссии по освещению. Светильники с СД, НЛВД и МГЛ, которые по своим характеристикам подходят для дорог классов *M1* и *M2* по освещению (далее – классы), сравнивались с точки зрения соответствующих им затрат. В данном исследовании был использован метод оценки затрат жизненного цикла (ОЗЖЦ), учитывающий капитальные затраты, стоимость электроэнергии и стоимость технического обслуживания. Результаты ОЗЖЦ показали, что для дорог класса *M2* экономическая эффективность светильников с СД почти совпадает с экономической эффективностью светильников с НЛВД, и что для дорог класса *M1* в случае светильников с СД полные затраты оказались примерно на 11,5 % ниже, чем в случае светильников с НЛВД.

**Ключевые слова:** освещение дорог, светильник с СД, энергоэффективность, затраты жизненного цикла.

## 1. Введение

Начиная с кризиса 1970-х, серьёзную обеспокоенность во всём мире вызывали связанные с ростом энергопотребления проблемы воздействия на окружающую среду и энергетической безопасности. В мировом масштабе, на освещение расходуется примерно 19 % от общего количества вырабатываемой энергии [1]. И согласно оценкам, примерно 3–4 % от всей вырабатываемой электроэнергии расходуется на освещение дорог [2]. Так как освещение является крупным мировым потребителем энергии, то улучшение энергоэффективности в этой области может привести к существенному снижению потребления энергии в целом [2].

В энергоэффективное освещение вкладываются значительные средства в целях уменьшения затрат на энергию и выбросов  $CO_2$ . Замена традиционного освещения на энергоэффективное светодиодное освещение может сократить выбросы парниковых газов на 670 Мт в год и на 50–70 % уменьшить затраты на энергию [3]. Многочисленные исследования показали, что при использовании

современного осветительного оборудования проекты по прямой замене источников света на светодиоды (СД) могут уменьшить затраты на энергию на вплоть до 50 % [4, 5].

В случае освещения дорог, СД источники света служат хорошей альтернативой традиционным источникам света, что обусловлено их цветовыми характеристиками, равномерным распределением света, более хорошей работе в условиях сумеречного зрения, управляемостью и небольшим вредным воздействием на окружающую среду [6, 7]. Кроме того, они позволяют управлять уровнем освещённости в соответствии с коэффициентом отражения дорожного покрытия, интенсивностью движения и погодными условиями, с тем, чтобы уменьшить энергопотребление без ущерба для срока службы светильника [8, 9]. По оценкам, благодаря более низкому энергопотреблению, воздействию, оказываемое светильниками с СД на окружающую среду (например, закисление среды, изменение климата, эвтрофикация, вредное воздействие на людей) в расчёте на 1 км освещаемой дороги, к 2020 г. будет на 41 % меньше, чем при использовании светильников с натриевыми лампами высокого давления (НЛВД) [10].

Метод оценки затрат жизненного цикла (ОЗЖЦ) можно использовать для выявления лучшего варианта капиталовложений. Этот метод позволяет определить выгодность вложений в освещение дорог [11, 12]. ОЗЖЦ подходит для выявления самой дешёвой из рассматриваемых осветительных установок (ОУ) и анализа выгоды планируемых капиталовложений. Были проведены многочисленные ОЗЖЦ применительно к традиционным светильникам [3, 14]. Уменьшения затрат жизненного цикла можно добиться за счёт использования более долговечных изделий с низким энергопотреблением (высокой световой отдачей) и малой закупочной ценой [15]. Проведённая в [14] ОЗЖЦ охватывала несколько сценариев, основанных на предполагаемых средней стоимости электроэнергии и световой отдаче светильников с СД и возможном снижении срока окупаемости таких светильников в ближайшие годы. Результаты исследований светильников с СД, используемых на турецких дорогах класса *M3*, показали, что светильники с СД способны обеспечить удовлетворения требований к качеству освещения таких дорог и сопоставимы с традиционными светильниками [13]. Кроме того, в некоторых исследованиях оценки жизненного цикла использовались для определения влияния дорожных светильников и ОУ на окружающую среду [10, 16].

В данной работе все образцы светильников сначала исследовались на предмет удовлетворения требований к освещению дорог. Затем предназначенные для дорог классов *M1* и *M2* по освещению (далее – классы *M1*, *M2*) традиционные светильники и светильники с СД сравнивали с точки зрения затрат жизненного цикла. В публикациях

<sup>1</sup> Перевод с англ. Е.И. Розовского

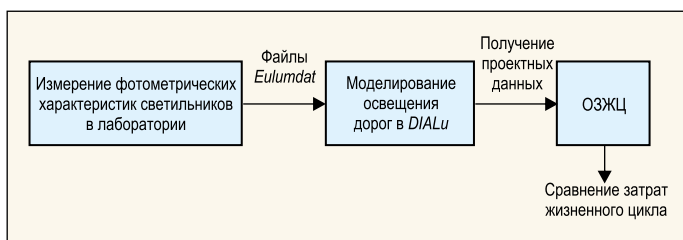


Рис. 1. Блок-схема методики

Международной комиссии по освещению (МКО) дороги подразделяются на классы в соответствии со скоростью и интенсивностью движения, погодой, составом транспорта, плотностью перекрёстков, разделением полос, наличием припаркованных автомобилей, яркостью окружающей среды и наличием визуальных указателей [17]. Метод ОЗЖЦ охватывает стоимости изготовления и технического обслуживания ОУ, стоимости замены светильников и потребляемой энергии, а также ликвидационную стоимость светильников.

## 2. Методика исследований и получение проектных данных

В этом разделённом на три этапа исследовании использовались разные методы, позволяющие выявить светильники, наиболее подходящие для дорог классов *M1* и *M2* с точки зрения реализуемых в турецких условиях затрат жизненного цикла. Блок-схема методики приведена на рис. 1.

Вначале у шести производителей (*L1*, *L2*, *L3*, *L4*, *L5* и *L6*) были закуплены дорожные светильники с НЛВД, металлогалогенными лампами (МГЛ) и СД, а именно, шесть традиционных светильников от трёх производителей и шесть светильников с СД. В традиционных светильниках в качестве источников света выступали НЛВД (*150 W Philips SON-T* и *250 W Philips SON-T*) и МГЛ (*150 W Sylvania CMI* и *250 W Philips HPI-T*). Мощности светильников с СД лежали в диапазоне от 80 до 170 Вт. Фотометрические характеристики этих двенадцати светильников были измерены в фотометрической лаборатории Университета Иллиз, Турция, при помощи интегрирующей сферы и гониофотометра. Измеренные характеристики включали в себя световой поток, распределение силы света, максимальную силу света, максимальный угол излучения, световую отдачу, мощность, коэффициент мощности, общий индекс цветопередачи МКО (ИЦП) и коррелированную цветовую температуру (КЦТ).

На втором этапе результаты измерений были сохранены в виде файлов *EULUMDAT* и перенесены в пакет программ для расчёта и проектирования освещения *DIALux*. Модели дорог были сформированы применительно к классам *M1* и *M2* и оптимизированы для получения наиболее подходящего проекта дороги. Для проведения ОЗЖЦ были отобраны светильники с НЛВД, МГЛ и СД, обеспечивающие выполнение требований к освещению дорог.

И наконец, результаты проектных расчётов были использованы при проведении анализа затрат жизненного цикла применительно к светильникам с НЛВД и МГЛ. Дальнейшее сравнение затрат жизненного цикла было проведено для тех светильников с НЛВД (*150 W L3* в случае *M2* и *250 W L3* в случае *M1*) и МГЛ (*150 W L3* в случае *M2*

и *250 W L1* в случае *M1*), у которых затраты жизненного цикла оказались наименьшими, и всех светильников с СД. Капитальные затраты, затраты на техническое обслуживание и стоимость электроэнергии рассчитывались с использованием действующих в Турции цен. Сроки службы светильников с НЛВД и МГЛ заканчивались к моменту завершения проекта (примерно 30 лет), так что их ликвидационная стоимость в этом исследовании не учитывалась. В то же время, ликвидационная стоимость светильников с СД учитывалась, в связи с тем, что часть их срока службы оставалась нереализованной.

### 2.1. Измерительное оборудование и результаты фотометрических измерений

НЛВД и МГЛ сначала измерили в интегрирующей сфере компании *Everfine Photo-E-Info Co., Ltd.* Перед началом испытаний лампы отжигали в течение 100 ч [18]. Лампы измеряли при работе с установленными в светильниках пускорегулирующими аппаратами (ПРА) и зажигающими устройствами для определения их световых потоков, КЦТ и ИЦП. КЦТ НЛВД и МГЛ лежали, соответственно, в интервалах от 2039 до 2083 К и от 4062 до 4127 К, а их ИЦП – соответственно, в интервалах от 28,7 до 29,6 и от 62,3 до 65,1. Значения КЦТ и ИЦП светильников с СД лежали, соответственно, в интервалах от 4000 до 4500 К и от 70 до 80. После измерения в сфере световых потоков ламп, при помощи гониофотометра компании *Everfine Photo-E-Info Co., Ltd.* были измерены распределения силы света, световые потоки и световые отдачи светильников.

СД источники света были встроены в светильники с СД, которые не содержали заменяемые СД модули. Поэтому измерения характеристик светильников с СД производились только в гониофотометре. Кроме того, испытания светильников с СД производились без отжига. Следует отметить, что световые потоки некоторых СД могут слегка возрастать на протяжении первых 1000 ч работы, хотя многие СД источники света подобное поведение не демонстрируют [19]. Температура и влажность в лаборатории поддерживались при помощи кондиционера равными  $25 \pm 1$  °С и 65 % соответственно. Силу света светильников измеряли с шагом 5° в интервале 0–355°, в результате чего количество плоскостей *S* оказалось равным 72, а применительно к углу  $\gamma$  измерения проводились с шагом 1° в интервале 0–90° в каждой из плоскостей *S*. Результаты фотометрических и электрических измерений образцов светильников представлены в табл. 1 и 2.

Как следует из табл. 1, примерно 67 % традиционных светильников имеют коэффициенты мощности, превышающие 0,90, тогда как световые отдачи этих светильников изменяются от 55,3 до 94,1 лм/Вт.

Как следует из табл. 2, измеренные значения мощности светильников с СД почти совпадают с номинальными, а коэффициенты мощности светильников с СД лучше, чем у традиционных светильников. Световые отдачи светильников с СД изменяются от 78,8 до 122,3 лм/Вт.

### 2.2. Проектные расчёты с использованием программы *DIALux*

Выбранные светильники имеют разные распределения силы света, которые следует учитывать при проектирова-

Фотометрические и электрические характеристики традиционных светильников

№	Наименование светильника*	Потребляемая мощность, Вт**	Коэффициент мощности	Световой поток, лм	Световая отдача, лм/Вт	Макс. угол излучения (С, λ), град	Тип кривой силы света светильника
1	150W HPS L1	166,0	0,939	13,087,4	78,8	5, 24	Ограниченная
2	150W HPS L2	174,9	0,951	13,824,1	79,0	320, 18	Неограниченная
3	150W HPS L3	148,6	0,930	12,579,0	84,7	145, 19	Полуограниченная
4	150W MH L1	163,5	0,939	9,554,9	58,4	180, 58	Ограниченная
5	150W MH L2	169,7	0,942	9,392,9	55,3	185, 67	Неограниченная
6	150W MH L3	148,8	0,931	9,398,2	63,1	10, 64	Полуограниченная
7	250W HPS L1	278,6	0,772	26,227,4	94,1	15, 31	Ограниченная
8	250W HPS L2	263,7	0,950	23,224,1	88,1	345, 48	Ограниченная
9	250W HPS L3	234,5	0,951	21,524,7	91,8	200, 14	Полуограниченная
10	250W MH L1	296,1	0,641	20,966,8	70,8	155, 25	Полуограниченная
11	250W MH L2	277,6	0,858	18,132,8	65,3	355, 64	Ограниченная
12	250W MH L3	263,2	0,844	17,784,4	67,6	350, 66	Неограниченная

\* HPS – натриевая лампа высокого давления, MH – металлогалогенная лампа, L1, L2, L3, L4, L5, L6 – наименования производителей дорожных светильников

\*\* Включая потери в пускорегулирующем аппарате

нии для удовлетворения требований к освещению дорог [20]. Результаты проектных расчётов, такие как расстояние между опорами, монтажная высота, угол наклона светильника и размер консоли, зависят от используемых светильников. Проект освещения дороги следует оптимизировать применительно к максимально возможному расстоянию между опорами.

С учётом минимальных требований к освещению дорог, для дорог классов M1 и M2 при помощи программы DIALux были рассчитаны максимальные расстояния между опорами. Остальные проектные параметры, такие как монтажная высота, размер консоли и угол наклона светильника, были определены исходя из эксплуатационных требований.

### 2.2.1. Проект освещения для дороги класса M2

Моделирование дороги было произведено для оценки качества освещения при использовании разных светильников. В целом, светильники с НЛВД и МГЛ мощностью 150 Вт используются для дорог классов M2 и M3 [21]. В рамках этой работы для дороги класса M2 использовались изготовленные тремя разными производителями (L1,

L2 и L3) светильники с НЛВД и МГЛ мощностью 150 Вт и изготовленные тремя разными производителями (L1, L4 и L5) светильники с СД мощностью от 80 до 114 Вт. Геометрия и модель освещения рассматривавшейся дороги класса M2 приведены на рис. 2 слева.

Смоделированная дорога включает в себя четыре полосы шириной 3,5 м каждая. Дорога освещается светильниками, расположенными напротив друг друга (двухрядная прямоугольная схема). Оценку освещения этой дороги производили применительно к дорожной обстановке A1, когда типичная скорость автотранспорта превышает 60 км/ч. Дорожное покрытие относится к типу R3, а коэффициент технического обслуживания считался равным 0,89 [22].

### 2.2.2. Проект освещения для дороги класса M1

На дорогах классов M1 и M2 обычно используются светильники с НЛВД и МГЛ мощностью 250 Вт. В рамках этой работы была выбрана дорога класса M1 с тремя полосами шириной 3,5 м в каждом направлении. Проектирование освещения осуществлялось для дорожной обстановки A1 применительно двухрядной осевой схеме освещения. Дорожное покрытие относится к типу R3, а коэффициент технического обслуживания считался равным 0,89. Геометрия и модель освещения этой дороги класса M1 приведены на рис. 2 справа.

Моделирование осуществлялось с использованием изготовленных тремя разными производителями (L1, L2 и L3) светильников с НЛВД и МГЛ

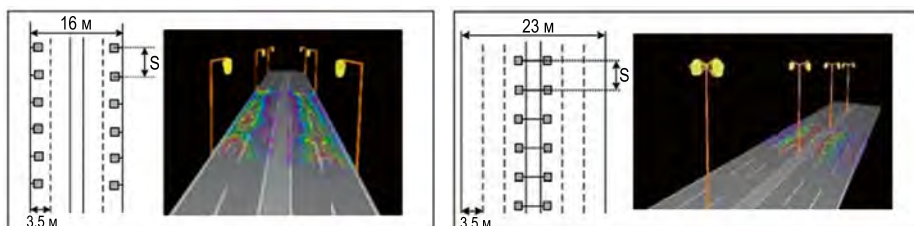


Рис. 2. Геометрии дорог классов M2 (слева) и M1 (справа)

## Фотометрические и электрические характеристики светильников с СД

№	Наименование светильника*	Потребляемая мощность, Вт**	Коэффициент мощности	Световой поток, лм	Световая отдача, лм/Вт	Макс. угол излучения (С, λ), град	Тип кривой силы света светильника
1	80W LED L1	79,35	0,984	7,392,5	93,1	180, 63	Ограниченная
2	80W LED L4	79,9	0,934	8,654,0	108,3	45, 49	Полуограниченная
3	105W LED L4	105,3	0,964	11,503,0	109,2	135, 50	Полуограниченная
4	114W LED L5	112,6	0,980	8,869,5	78,8	160, 60	Полуограниченная
5	170W LED L3	163,6	0,972	15,331,0	93,7	15, 61	Ограниченная
6	153W LED L6	152,5	0,987	18,656,85	122,3	155, 67	Неограниченная

\* LED – светодиод, L1, L3, L4, L5 – наименования производителей дорожных светильников

\*\* Включая потери в устройстве управления

мощностью 250 Вт и изготовленных двумя разными производителями (L3 и L6) светильников с СД.

### 2.2.3. Результаты проектных расчётов освещения дорог

Расчёты для дорог классов M1 и M2 производились при помощи программы *DIALux*. Из-за создаваемой светильниками блёскости, пороговое приращение яркости в случае светильника 150 W L2<sup>2</sup> не удовлетворяло требованиям для дорог класса M2 (≤ 10).

Светильнику L1 соответствовал наибольший шаг между опорами (36 м), а установленная мощность в этом случае оказалась равной 9296 Вт/км. Светильники L3 HPS потребляют 8619 Вт/км при шаге между опорами 35 м. При этом количество приходящихся на 1 км дороги светильников L1 меньше, чем количество светильников L3, так что в первом случае капитальные затраты и затраты на техническое обслуживание также будут меньше. С другой стороны, приходящаяся на 1 км дороги стоимость электроэнергии в случае светильника L3 будет меньше, чем в случае светильника L1. Поэтому для выбора наиболее экономически эффективного светильника полные затраты при использовании светильников L1 и L3 (с НЛВД и МГЛ соответственно) следует определять на основе ОЗЖЦ.

С точки зрения приходящегося на 1 км дороги потребления энергии, наиболее предпочтительными являются светильники с СД. Однако сравнение традиционных светильников и светильников с СД следует производить с учётом капитальных затрат и затрат на техническое обслуживание.

### 3. Оценка затрат жизненного цикла (ОЗЖЦ)

ОЗЖЦ осуществляется применительно ко всему проектному сроку службы ОУ и учитывает как затраты на изготовление, техническое обслуживание, замену и эксплуатацию изделий, так и их ликвидационную стоимость. Для определения текущей стоимости капиталовложений используется чистая приведённая стоимость (ЧПС), так что при ОЗЖЦ все затраты приводятся к текущим ценам.

<sup>2</sup> Здесь и далее светильники обозначаются в соответствии со вторыми столбцами табл. 1–6. – Прим. пер.

Уравнение (1), используемое в данной работе для определения ЧПС, записано с учётом как инфляции, так и размера процентной ставки:

$$ЧПС = \sum_{k=1}^{30} A * \frac{(1+e)^k}{(1+i)^k}, \quad (1)$$

где  $A$  – текущая стоимость,  $e$  – уровень инфляции,  $i$  – размер процентной ставки,  $k$  – годы.

В первую очередь, методом ОЗЖЦ было проведено сравнение традиционных светильников между собой, и на основе полученных результатов были отобраны светильники с НЛВД и МГЛ, которым соответствуют минимальные полные затраты жизненного цикла, а именно, светильники с НЛВД 150W HPS L3 и 250W HPS L3 и светильники с МГЛ 150W MH L3 и 250W MH L1. Что касается светильников с СД, то ОЗЖЦ производилась применительно ко всем таким светильникам. Характеристики соответствующих ОУ для дорог классов M1 и M2 приведены в табл. 3 и 4. ОЗЖЦ включает в себя затраты на ОУ на всём протяжении её проектного срока службы (для дорожного освещения это обычно 30 лет) [14]. Так что при проведении анализа проектный срок службы принимался равным 30-ти годам при равной 3650 ч годовой продолжительности работы ОУ. Экономические сроки службы традиционных светильников составляют 30 лет, в течение которых эти светильники не заменяют на новые. Так что цикл замены совпадает с циклом замены ламп в случае традиционных светильников и с циклом замены светильников в случае светильников с СД.

При этом, так как светильники с СД рассматриваются как единое целое (включая СД модуль, устройство управления, линзы и т.д.), то срок службы светильника с СД определяется исходя из сроков службы его компонентов. Срок службы устройства управления меньше, чем срок службы СД источника света [23], и 90 % отказов устройств с СД связаны с устройствами управления [23]. В настоящее время нет стандартов на заменяемые детали светильников с СД. Производители светильников постоянно отмечают, что светотехнической промышленности следует усовершенствовать стандартизированные устройства

Характеристики, использовавшиеся при ОЗЖЦ для дороги класса М2

№	Наименование светильника*	Кол-во светильников, шт./км	Кол-во опор, шт./км	Срок службы лампы, ч	Периодичность замены, лет	Стоимость светильника, ТЛ/шт.	Стоимость лампы, ТЛ/шт.
1	150W HPS L3	58	58	20000	5	140,00	33,00
2	150W MH L3	72	72	12000	3	140,00	33,00
3	80W LED L1	74	74	50000	13	420,00	-
4	80W LED L4	74	74	50000	13	470,00	-
5	105W LED L4	64	64	50000	13	530,00	-
6	114W LED L5	64	64	50000	13	630,00	-

\* HPS – натриевая лампа высокого давления, MH – металлогалогенная лампа, LED – светодиод, L1, L3, L4, L5 – наименования производителей дорожных светильников

управления, предназначенные для СД освещения [23]. Если в случае освещения дорог имеет место отказ отдельного светильника, то его замена и техническое обслуживание оказываются более дорогостоящими, и города стараются этого избежать [24]. Для осуществления более экономичного и практически целесообразного технического обслуживания, в установках уличного освещения производится групповая, а не точечная замена ламп. В рамках этого исследования, компоненты светильников с СД (такие как устройство управления и СД модуль (источник света)) в рассматриваемый период времени не заменяют, и схема замены СД светильников предусматривает замену всего светильника в целом после его использования в течение предполагаемого срока службы.

В соответствии с ОЗЖЦ, полные затраты получают после вычета ликвидационной стоимости (SV) из суммы капитальных затрат (IC), стоимости электроэнергии (EC) и затрат на техническое обслуживание (MC) [11]. Расчёт затрат производился применительно к 1 км дороги по приведённым ниже формулам.

$$TC = IC + MC + EC - SV, \quad (2)$$

$$IC = N * (N_p + N_{mp}) + L * (L_p + L_{mp}) + P * (P_p + P_{mp}) + C * (C_p + C_{mp}) + YC * (YC_p + YC_{mp}), \quad (3)$$

$$MC = L * (L_p + L_{mp}) + (S_n * S_p + F_p) * N / (S * t_d), \quad (4)$$

$$EC = N * P_i * 365 * E_p * 10^{-3} * t_o, \quad (5)$$

где  $N$  – количество светильников,  $N_p$  – стоимость одного светильника,  $N_{mp}$  – стоимость установки светильника,  $L$  – количество ламп,  $L_p$  – стоимость одной лампы,  $L_{mp}$  – стоимость установки лампы,  $P$  – количество опор,  $P_p$  – стоимость одной опоры,  $P_{mp}$  – стоимость установки опоры,  $C$  –

длина воздушного кабеля,  $C_p$  – стоимость единицы длины воздушного кабеля,  $C_{mp}$  – стоимость прокладки единицы длины воздушного кабеля,  $YC$  – длина подземного кабеля,  $YC_p$  – стоимость единицы длины подземного кабеля,  $YC_{mp}$  – стоимость прокладки единицы длины подземного кабеля,  $S$  – количество светильников, техническое обслуживание которых производится в течение 1 ч,  $S_n$  – количество персонала, осуществляющего техническое обслуживание,  $S_p$  – суточные затраты на обслуживающий персонал,  $F_p$  – стоимость горючего для одного автомобиля в сутки;  $t_d$  – количество рабочих часов в сутки,  $P_i$  – мощность светильника,  $E_p$  – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии,  $t_o$  – суточная продолжительность работы светильника.

При этом ликвидационная стоимость рассчитывалась применительно к незадействованной части экономического срока службы светильника, так что, другими словами, ликвидационную стоимость имеют только те светильники с СД, которые заменяются по окончании проектного срока службы ОУ. В Турции утилизация светильников и их компонентов осуществляется муниципалитетами бесплатно, поэтому затраты на утилизации при ОЗЖЦ в данном исследовании не учитывались.

Расчёт затрат на техническое обслуживание, стоимости электроэнергии и ликвидационной стоимости производился методом ЧПС [13]. Стоимость технического обслуживания рассчитывалась для каждого периода между заменами в отдельности, а затем методом ЧПС определялась полная стоимость технического обслуживания. В случае традиционных светильников в уравнение (4) была включена стоимость замены электромагнитного ПРА. Текущая полная стоимость электроэнергии на протяжении проектного срока службы рассчитывалась по формуле [25, 26]:

Полная текущая стоимость электроэнергии =

$$= EC * (1 + e) * \frac{1 - \left(\frac{1 + e}{1 + i}\right)^{30}}{i - e}, \quad (6)$$

В этом исследовании все расчёты производились в турецких лирах (ТЛ). В отличие от европейских стран, в Тур-

Характеристики, использовавшиеся при ОЗЖЦ для дороги класса М1

№	Наименование светильника*	Кол-во светильников, шт./км	Кол-во опор, шт./км	Срок службы лампы, ч	Периодичность замены, лет	Стоимость светильника, ТЛ/шт.	Стоимость лампы, ТЛ/шт.
1	250W HPS L3	64	32	20000	5	212,00	45,00
2	250W MH L1	68	34	12000	3	212,00	45,00
3	170W LED L3	76	38	50000	13	400,00	-
4	153W LED L6	68	34	50000	13	550,00	-

\* HPS – натриевая лампа высокого давления, MH – металлогалогенная лампа, LED – светодиод, L1, L3, L6 – наименования производителей дорожных светильников

ции имеют место высокие уровни инфляции и процентные ставки, что следует учитывать при проведении долгосрочного экономического анализа капиталовложений. Так как рассматриваемые светильники предназначены для турецких дорог, то при проведении расчётов использовались уровни инфляции и процентные ставки Центрального банка Турции, принятые равными 8,5 и 10,5 % соответственно [27, 28]. Цены светильников были взяты из текущих каталогов производителей. Стоимости труда работников и монтажных работ определялись на основе действующих в Турции расценок.

Стоимость технического обслуживания традиционных светильников включает в себя замену ламп и ПРА и чистку светильников. При замене лампы осуществляется и чистка светильника. Замена ПРА на протяжении проектного срока службы ОУ производится дважды. Стоимости электромагнитных ПРА для ламп мощностью 150 и 250 Вт составляют, соответственно, 32,00 и 43,00 ТЛ за 1 шт. Считалось, что на протяжении проектного срока службы ОУ замена традиционных светильников не производится. С другой стороны, светильники с СД считают неразборными, так что в их случае замена источников света не производится. Средний срок службы светильников с СД составляет 50000 ч, так что расчётный срок замены этих светильников составляет 13,7 лет, и за 30 лет светильники с СД заменяют дважды, примерно через 13 и 27 лет после начала эксплуатации ОУ. Кроме того, техническое обслуживание светильников с СД осуществляется с интервалом 5 лет. Входящие в уравнение (4) затраты на техническое обслуживание зависят от зарплаты персонала и стоимости топлива, а также продолжительности рабочего дня и количества ламп. Два работника обслуживают с заменой ламп 10 светильников в час. Суточные затраты на оплату труда и продолжительность рабочего дня составляют 80,00 ТЛ и 8 ч соответственно. На топливо для транспорта расходуется 150,00 ТЛ в сутки. Суточная и годовая продолжительности работы светильника считаются равными 10 и 3650 ч соответственно. Стоимость предназначенной для освещения электроэнергии в Турции составляет 0,257 ТЛ/кВт·ч. Расчёт затрат на электроэнергию производится по формуле (5).

Описываемые уравнением (3) капитальные затраты включают в себя стоимости ламп, опор, кабелей, труда и светильников. Количество светильников и опор на 1 км

дороги рассчитывались при помощи программы *DIALux*. Стоимость опоры со вспомогательным оборудованием составляет в среднем 750,00 ТЛ/шт. при равной 10,00 ТЛ на 1 м высоты опоры стоимости установки опоры. Стоимости установки светильника и лампы составляют, соответственно, 75,00 и 5,00 ТЛ/шт. Стоимость кабеля рассчитывалась как для воздушных, так и для подземных кабелей. Длина подземного кабеля определялась умножением количества опор на шаг между опорами, а длина воздушного кабеля – умножением высоты установки светильника на количество опор на 1 км дороги. Стоимости подземного кабеля и его прокладки составляют, соответственно, 7,50 и 35,00 ТЛ/м, а стоимости воздушного кабеля и его прокладки составляют, соответственно, 4,50 и 2,00 ТЛ/м.

Ликвидационная стоимость рассчитывалась применительно к установленным последними светильникам с СД. Светильники с СД следует заменять на новые по истечении их срока службы, т.е. каждые 50000 ч, и если продолжительность периода, применительно к которому осуществляется экономический анализ (проектный срок службы ОУ), считать равным 30-ти годам, а продолжительность эксплуатации светильника с СД – равной 13,7 лет (при годовой продолжительности работы 3500 ч и сроке службы 50000 ч), то последний установленный светильник проработает только 2,6 лет. В этом случае необходимо определить соответствующую неиспользованному времени работы ликвидационную стоимость светильника, которую вычитают из полных затрат. Остаточная стоимость светильника после второй замены рассчитывается по формуле [11]:

$$100 \times \left( 1 - \frac{30 - (2 \times 13.7)}{13.7} \right) = 81\%. \quad (7)$$

В течение проектного срока службы ОУ 81 % срока службы установленных последними светильников с СД остаются неизрасходованными. При равной 470,00 ТЛ стоимости светильника ликвидационная стоимость последнего светильника с СД оказывается равной  $470,00 \times 0,81 = 370,70$  ТЛ. Эта стоимость будет зависеть от уровня инфляции и размера процентной ставки, так что для расчёта текущего значения ликвидационной стоимости использовалось уравнение (1).

Результаты расчёта полной ЧПС для дороги класса *M2*

№	Наименование светильника*	Капитальные затраты, ТЛ/км	Стоимость электроэнергии, ТЛ/км	Затраты на техобслуживание, ТЛ/км	Ликвидационная стоимость, ТЛ/км	Полные затраты, ТЛ/км
1	150W HPS L3	154976,00	173473,47	11379,34	-	339828,82
2	150W MH L3	168588,00	215636,21	22956,06	-	407180,28
3	80W LED L1	194139,00	118111,23	41683,97	12670,98	341263,22
4	80W LED L4	191734,00	119004,88	52888,19	14179,43	349447,64
5	105W LED L4	183712,00	135255,69	50740,32	13828,82	355879,19
6	114W LED L5	186944,00	145045,62	58943,61	16438,03	374495,21

\* HPS – натриевая лампа высокого давления, MH – металлогалогенная лампа, LED – светодиод, L1, L3, L4, L5 – наименования производителей дорожных светильников

Таблица 6

Результаты расчёта полной ЧПС для дороги класса *M2*

№	Наименование светильника*	Капитальные затраты, ТЛ/км	Стоимость электроэнергии, ТЛ/км	Затраты на техобслуживание, ТЛ/км	Ликвидационная стоимость, ТЛ/км	Полные затраты, ТЛ/км
1	250W HPS L3	96704,00	302071,04	16322,06	-	415097,10
2	250W MH L1	99297,00	405259,86	28077,40	-	532634,26
3	170W LED L3	116698,00	250255,23	47483,18	12393,76	402042,65
4	153W LED L6	115515,00	208720,46	55619,08	15247,58	364606,96

\* HPS – натриевая лампа высокого давления, MH – металлогалогенная лампа, LED – светодиод, L1, L3, L6 – наименования производителей дорожных светильников

#### 4. Результаты анализа затрат

ОЗЖЦ светильников осуществлялась применительно к равной 30-ти годам продолжительности работы ОУ. Применительно к полным затратам, ЧПС включает в себя капитальные затраты, стоимость электроэнергии, затраты на техническое обслуживание и ликвидационную стоимость. Результаты ОЗЖЦ, проведённой для разных светильников в расчёте на 1 км дорог классов *M2* и *M1*, приведены в табл. 5 и 6 соответственно.

Согласно табл. 5, светильникам HPS L3 и LED L1 соответствуют почти одинаковые затраты жизненного цикла, и они являются наиболее эффективными для дороги класса *M2*. При этом, хотя в случае светильника с НЛВД HPS L3 стоимость электроэнергии примерно на 32 % превышает стоимость электроэнергии случае светильника с СД LED L1, капитальные затраты в первом случае оказались примерно на 20 % меньше, чем во втором. Затраты на техническое обслуживание включают в себя замену светильников с СД в целом, тогда как у традиционных светильников заменяют только лампы. Поэтому затраты на техническое обслуживание светильников с СД оказываются более высокими, чем в случае традиционных светильни-

ков. Светильникам с МГЛ соответствуют наиболее высокие полные затраты, что связано с их низкой световой отдачей и малым сроком службы ламп.

Результаты, приведённые в табл. 6, говорят о том, что для дороги класса *M1* самым лучшим по сравнению с остальными светильниками капиталовложением является светильник с СД LED L6. Хотя на 1 км дороги светильников LED L6 приходится больше, чем традиционных светильников (68 и 64 шт./км соответственно), благодаря более высокой, чем у традиционных светильников, световой отдаче этого светильника с СД, стоимость электроэнергии в случае светильников LED L6 оказалась наименьшей. Кроме того, потери в электромагнитных ПРА традиционных светильников приводят к значительному увеличению энергопотребления. В случае светильников с МГЛ стоимость электроэнергии и полные затраты оказались больше, чем у светильников LED L6, на примерно 48, 5 и 31 % соответственно.

#### 5. Заключение

В рамках этого исследования были проведены лабораторные измерения традиционных светильников и све-

тильников с СД, предназначенных для дорог классов *M1* и *M2*. При помощи программы *DIALux* были проведены расчёты в целях оптимизации максимального шага между опорами при удовлетворении минимальных требований к освещению дорог, относящихся к разным классам по освещению. Для наиболее экономически эффективных традиционных светильников и современных светильников с СД были сопоставлены затраты жизненного цикла с учётом капитальных затрат, стоимости электроэнергии, затрат на техническое обслуживание и ликвидационной стоимости светильников.

Проведённые ОЗЖЦ показали, что в случае новых ОУ для дорог класса *M2* при равном 30-ти годах сроке эксплуатации экономическая эффективность светильников *80 W LED L3* и *150 W HPS L1* почти совпадает. Однако светильники с СД могут оказаться более предпочтительными благодаря меньшему потреблению электроэнергии и, соответственно, меньшему выбросу  $CO_2$  электростанциями, и более высокому качеству освещения. Применительно к дорогам классов *M1* и *M2*, наибольшие полные затраты были получены в случае светильников с МГЛ. В то же время, в случае дорог класса *M1* полные затраты при использовании светильников с СД *153 W LED L6* оказались ниже, чем при использовании светильников с НЛВД *250 W HPS* и светильников с МГЛ *250 W MH*. Для всех категорий капитальные затраты оказались выше в случае светильников с СД, что связано с большей стоимостью таких светильников, тогда как стоимость электроэнергии в случае светильников с СД оказалась ниже, чем у традиционных светильников.

Это исследование также продемонстрировало важность сравнения различных типов светильников (с НЛВД, МГЛ и СД) с точки зрения энергосбережения, качества освещения и экономической эффективности. Согласно полученным результатам, экономическая эффективность ОУ с СД зависит, в первую очередь, от следующих основных параметров: стоимости электроэнергии и стоимости светильников. А так как стоимость светильников с СД непрерывно уменьшается, то в будущем они найдут более широкое применение. Если же стоимость электроэнергии будут возрастать из-за уменьшения запасов нефти, то светильники с СД окажутся экономически более привлекательными для освещения дорог.

Авторы благодарят Турецкий совет по проведению исследований в области науки и техники (*TUBITAK*) и Совет Технического университета Илдиз по координации исследовательских работ (проект *YTU-BAPK-Grand № 2015-04-02-KAP01*) за финансовую поддержку при проведении этих исследований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Light's Labour's Lost: Policies for energy-efficient lighting. Paris: IEA (International Energy Agency), 2006.
2. Avrenli, K.A., Benekahal, R.R., Medina, J. LED roadway lighting, Volume 1: Background information. FHWA-ICT-12-012, Illinois, 2012.
3. Lighting the Clean Revolution: The rise of LEDs and what it means for cities. London: The Climate Group, 2012.
4. Dubois, M. C., Blomsterberg, A. Energy saving potential and strategies for electric lighting in future North European, low energy office buildings: A literature review // *Energy Build.*– 2011. – Vol. 43, No. 10. – P. 2572–2582.
5. Juntunen, E., Tetri, E., Tapaninen, O., Yrjänä, S., Kondratyev, V., Sitomaniemi, A., Siirtola, H., Sarjanoja, E., Aikio, J., Heikkinen, V. A smart LED luminaire for energy savings in pedestrian road lighting // *Light. Res. Technol.*– 2015. – Vol. 47, No. 1. – P. 103–115.
6. Bullough, J.D., Radetsky, L.C., Besenecker, U.C., Rea, M.S. Influence of spectral power distribution on scene brightness at different light levels // *LEUKOS.*– 2014. – Vol. 10, No. 1. – P. 3–9.
7. DOE (U.S. Department of Energy). Solid-state lighting program 'R&D plan, 2016.
8. Domenichini, L., La Torre, F., Vangi, D., Virga, A., Branzi, V. Influence of the lighting system on the driver's behavior in road tunnels: A driving simulator study // *J. Transp. Saf. Secur.*– 2017. – Vol. 9, No. 2. – P. 216–238.
9. Guo, S., Gu, H., Wu, L., Jiang, S. Energy-saving tunnel illumination system based on LED's intelligent control // *J. Phys. Conf. Ser.*– 2011. – Vol. 276, No. 1. – P. 12164.
10. Tähkämö, L., Halonen, L. Life cycle assessment of road lighting luminaires – Comparison of light-emitting diode and high-pressure sodium technologies // *J. Clean. Prod.*– 2015. – Vol. 93, No. 1. – P. 234–242.
11. Avrenli, K.A., Benekahal, R.R., Medina, J. LED roadway lighting, Volume 2: Field evaluations and software comparisons. FHWA-ICT-12-013, Illinois, 2012.
12. FHWA U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration Office of Asset Management. Life-cycle cost analysis primer. Washington, 2002.
13. Onaygil, S., Guler, O., Erkin, E. Cost analyses of LED luminaires in road lighting // *Light & Engineering.*– 2012. – Vol. 20, No. 2. – P. 39–45.
14. Tähkämö, L., Ylinen, A., Puolakka, M., Halonen, L. Life cycle cost analysis of three renewed street lighting installations in Finland // *Int. J. Life Cycle Assess.*– 2012. – Vol. 17, No. 2. – P. 154–164.
15. Jiang, Y., Li, S., Guan, B., Zhao, G. Cost effectiveness of new roadway lighting systems // *J. Traffic Transp. Eng.*– 2015. – Vol. 2, No. 3. – P. 158–166.
16. Welz, T., Hischer, R., Hilty, L.M. Environmental impacts of lighting technologies – Life cycle assessment and sensitivity analysis // *Environ. Impact Assess. Rev.*– 2011. – Vol. 31, No. 3. – P. 334–343.
17. CIE115:2010 Recommendations for the lighting of roads for motor and pedestrian traffic. Vienna, Austria, 2010.
18. IES LM-54-99 Guide to Lamp Seasoning. 1999.
19. IES LM-79-08 The electrical and photometric measurements of solid-state lighting products. 2008.
20. EN13201-3:2013 Road Lighting – Part 3: Calculation of performance.
21. EN13201-1:2004 Road lighting – Part 1: Selection of lighting classes.
22. CIE180:2007 Road transport lighting for developing countries. Vienna, Austria, 2007.
23. LED Luminaire Lifetime: Recommendations for testing and reporting // DOE (U.S. Department of Energy), 2011.
24. Tähkämö, L., Räsänen, R.-S., Halonen, L. Life cycle cost comparison of high-pressure sodium and light-emitting diode luminaires in street lighting // *Int. J. Life Cycle Assess.*– 2016. – Vol. 21, No. 2. – P. 137–145.
25. Teodorescu, R., Katsanevakis, M. An optimization method for designing large PV plants // *J. Photovoltaics.*– 2013. – Vol. 3, No. 2. – P. 814–822.



26. Life cycle cost analysis manual. Illinois: State of Illinois Capital Development Board, 1991.

27. CBRT, «The Central Bank of The Republic of Turkey,» 2016. [Online]. Available: <http://www.tcmb.gov.tr/wps/wcm/connect/tcmb+en/tcmb+en>. [Accessed: 12-Sep-2016].

28. TSI, «Turkish Statistical Institute.» [Online]. Available: <http://www.turkstat.gov.tr/Start.do>. [Accessed: 12-Sep-2016].



**Рамазан Аяз (Ramazan Ayaz), Ph.D. (2018 г.).** Ассистент электротехнического факультета Технического университета Илдииз. Область научных интересов: освещение дорог, энергоэффективные и фотоэлектрические системы



**Азийе Каймаз Озканли (Asiye Kaymaz Ozcanli), M. Sc. (2016 г.).** Аспирант Технического университета Илдииз



**Измаил Накир (Ismail Nakir), Ph.D. (2012 г.).** Доцент электротехнического факультета Технического университета Илдииз. Область научных интересов: освещение и возобновляемые источники энергии



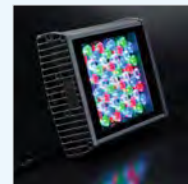
**Прамод Бхусал (Pramod Bhusal), Ph.D. (2009 г.).** Научный сотрудник светотехнического отделения Университета Аалто, Финляндия. Область научных интересов: энергоэффективное освещение, колориметрия, ориентированное на людей освещение и организация освещения. Автор более чем 20-ти печатных работ



**Адем Унал (Adem Unal), Ph.D. (1995 г.).** Доцент электротехнического факультета Технического университета Илдииз. Область научных интересов: освещение и теория цепей.

## IntiLED вступила в проект национального бренда «Made in Russia // Сделано в России»

В августе 2018 г. компания IntiLED вступила в проект национального бренда «Made in Russia // Сделано в России». Цель проекта «Made in Russia» – повышение узнаваемости российских брендов и продукции за рубежом. «Сделано в России» – это в первую очередь инструмент для продвижения национальной системы качества. Проект призван подтвердить добросовестность отечественного производителя как надёжного поставщика и сформировать современный имидж российского экспорта. Вступая в программу, IntiLED подтвердила высокое качество и страну происхождения выпускаемых изделий.



Участие в «Made in Russia» упростило для компании выход на международные рынки, позволяя продвигать продукцию IntiLED под единым брендом «Made in Russia». IntiLED станет частью коллективного продвижения экспорта, бизнеса и культуры России. Проект был запущен в 2015 г. Логотип национального бренда «Сделано в России» – это соединение штрих-кода и текстуры бересты. В логотипе заключены ассоциации с бизнесом, производством товаров, их продажей, а также с богатой культурой и историей предпринимательства в России.

intiled.ru/  
08.2018

## Облучение светодиодами широко используется в вертикальных фермах для повышения объёма местных поставок продуктов питания

Благодаря светодиодам, сельхозпроизводство можно вести в местах со сложными окружающими условиями, обеспечивая тем самым местные поставки продуктов питания и уменьшение дальности перевозок. Вертикальные фермы организуют во всём мире в целях более эффективного и менее ресурсоёмкого производства продуктов питания.



В Шотландии агротехническая компания Intelligent Growth Solutions (IGS) представила первую в этой местности вертикальную ферму, заявив, что благодаря запатентованным ею решениям эта ферма самая совершенная из ферм в мире, расположенных в помещениях. Согласно IGS, этой вертикальной фермой можно управлять с помощью платформы, состоящей из запатентованных электрических, электронных и механических устройств, которые, в свою очередь, управляются платформой программного обеспечения услуг и базы данных («SaaS & data platform») с использованием искусственного интеллекта. Это решение поможет снизить потребление энергии на 50 % по сравнению с другими решениями установок для выращивания растений в помещениях.

Вертикальные фермы появились в целях снижения нецелевого расхода воды, исключения использования пестицидов и уменьшения дальности перевозок продуктов питания за счёт обеспечения возможности выращивания овощей на месте и по заявкам, что приводит к 90 %-ному снижению потерь продуктов питания. Вертикальная ферма компании IGS расположена в Институте Джеймса Хаттона (James Hutton Institute), занимающемся исследованиями по выращиванию растений. Сотрудники этого института будут вместе с компанией IGS исследовать влияние разных фитооблучателей на урожайность и качество выращиваемых растений.

В то же время, в Лас-Вегасе недавно созданная компания Oasis Biotech превратила заброшенное промышленное предприятие в одну из крупнейших в США вертикальных ферм. Эта ферма уже поставляет продукцию в рестораны Лас-Вегаса с момента своего открытия в июле этого года. Благодаря использованию облучения светодиодами и контролируемыми условиям в помещении она может давать свежие овощи круглогодично.

ledinside.com  
28.08.2018