

# Состояние и перспективы развития дорожного освещения<sup>1</sup>

С.БОЗОРГ ЧЕНАНИ<sup>1</sup>, Р.-С. РЯСЯНЕН<sup>1</sup>, Е. ТЕТРИ<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Университет Аалто, Эспо, Финляндия

<sup>2</sup>Эксперт в области освещения, Эспо, Финляндия

<sup>3</sup> E-mail: eino.tetri@gmail.com

## Аннотация

Дорожное освещение находится на пороге самых значимых с момента его первой реализации изменений. Совокупность достижений в области технических средств дорожного освещения и способов их применения может привести к изменению концепции дорожного освещения. Согласно большинству оценок, светодиоды (СД) являются наиболее эффективными источниками света из всех, которые могут использоваться в дорожном освещении. На данный момент, при замене светильников с натриевыми лампами высокого давления на светильники с СД экономия энергии составляет 1/3, а в будущем, по мере усовершенствования изделий с СД, она возрастёт до 2/3, тогда как теоретически экономия может достичь 83 %. Экономия энергии может быть обеспечена благодаря изменению подхода к освещению, подразумевающему использование интеллектуальных систем управления дорожным освещением, которые позволяют уменьшить продолжительность работы осветительных установок. В основу интеллектуального управления дорожным освещением могут быть положены такие параметры, как интенсивность движения, уровень естественного освещения, состояние дороги и погодные условия. При этом управление можно сделать более динамичным, учитывающим совокупное действие дорожного освещения и света фар автомобилей. Можно ожидать, что широкое внедрение новой прогрессивной техники приведёт к увеличению экологической безопасности освещения.

**Ключевые слова:** энергоэффективность, светодиод, СД, источник света, безопасность дорожного движения, дорожное освещение, экологическая безопасность.

## 1. Введение

Дорожное освещение имеет большое значение для всех участников дорожного движения, позволяя замечать препятствия, заранее принимать решения и избегать дорожно-транспортных происшествий (ДТП). В то же время, всё труднее игнорировать связанные с дорожным освещением вопросы потребления и стоимости электроэнергии. По оценкам Международного энергетического агентства, в 2005 г. 19 % от общемирового потребления электроэнергии приходилось на освещение, причём на дорожное освещение было затрачено 218 ТВт·ч, что составляет примерно 8 % от расходуемой на освещение энергии [1].

Затраты на электроэнергию могут быть уменьшены в результате совершенствования техники и изменения организации освещения, позволяющих реализовать интеллектуальное дорожное освещение. Освещение перешло от газовых светильников к лампам накаливания, а затем к лю-

минесцентным лампам, ртутным лампам высокого давления (ДРЛ), натриевым лампам низкого давления (НЛНД), натриевым лампам высокого давления (НЛВД), металлогалогенным лампам (МГЛ) и, наконец, к новым источникам света – светодиодам (СД). Это прогресс привёл к улучшению эффективности и экономичности источников света, равно как и к увеличению их сроков службы, улучшению их цветовых характеристик, появлению возможности светорегулирования и уменьшению времени разгорания и погасания используемых в дорожном освещении осветительных приборов [2].

Очевидно, что энергоэффективность играет важную роль в модернизации дорожного освещения. Однако имеются и дополнительные возможности в части уменьшения энергопотребления, связанные с изменением организации дорожного освещения (на основе систем интеллектуального дорожного освещения) и регулированием дорожного освещения там и тогда, где и когда это нужно, исходя из сиюминутной потребности в освещении.

Переход к новым техническим средствам дорожного освещения и новым способам их применения предполагает целый ряд преимуществ, таких как уменьшение количества и стоимости потребляемой электроэнергии, сокращение затрат на техническое обслуживание и возможность реализации более экологически безопасных решений. Однако при принятии каких бы то ни было решений относительно капиталовложений в дорожное освещение или использования интеллектуальных устройств управления, необходимо всегда помнить о назначении дорожного освещения. Основной задачей дорожного освещения является обеспечение безопасности посредством улучшения видимости источников опасности и уменьшения воздействия блеска, создаваемой наблюдаемыми источниками света [3]. Многочисленные исследования показали, что дорожное освещение способно уменьшить количество ДТП [5, 6], и поэтому чрезвычайно важно иметь представление о происходящих в дорожном освещении изменениях.

В основу данной работы положена статья Тетри и др. [2], в которой авторы затрагивали многие вопросы и рассматривали самые разные связанные с дорожным освещением моменты, такие как сумеречное зрение, видимость, безопасность и трёхмерное моделирование световой среды, тогда как в данной статье, которая посвящена, главным образом, техническим средствам дорожного освещения, безопасности дорожного движения и экологии, рассмотрены влияние освещения на безопасность дорожного движения, преимущества от использования СД и экологические последствия совершенствования дорожного освещения. При этом в основу описания изменений в области дорожного освещения и обсуждения перспективного подхода к дорожному освещению положены последние технические достижения.

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

## 2. Безопасность дорожного движения

Согласно Всемирной организации здравоохранения, в 2015 г. в ДТП погибли более чем 1,2 млн человек, что делает ДТП одной из 10 основных причин смертности в мире [7]. В целом, причины ДТП связаны с людьми (57 %), дорогами (3 %) и транспортными средствами (3 %), а остальное приходится на их совокупное действие [8].

Однако попытки изучения влияния на ДТП какого-то одного фактора, например, дорожного освещения, связаны с определёнными трудностями. Во-первых, на ДТП влияют многочисленные взаимосвязанные факторы, что затрудняет выделение именно дорожного освещения [8]. Во-вторых, до и после организации дорожного освещения водители ведут себя по-разному. Например, в [9] исследовалось изменение поведения норвежских водителей в части скорости и концентрации внимания после организации дорожного освещения. В результате появления дорожного освещения увеличилось количество пожилых водителей, возросла скорость движения и явно уменьшилась концентрация внимания. В результате эти взаимосвязанные факторы отрицательно сказались на точности оценки влияния дорожного освещения на ДТП [9]. Для количественной оценки влияния дорожного освещения на ДТП было проведено сравнение данных о ДТП, имевших место или там, где дорожное освещение раньше отсутствовало, а потом появилось, или там, где дорожное освещение было усовершенствовано. Это можно сделать при помощи отношения шансов, которое служит для количественной оценки влияния дорожного освещения на ДТП:

Отношение шансов =

$$= \frac{\text{Кол-во ДТП на освещённых дорогах в тёмное время суток}}{\text{Кол-во ДТП на неосвещённых дорогах в тёмное время суток}} \div \frac{\text{Кол-во ДТП на освещённых дорогах в светлое время суток}}{\text{Кол-во ДТП на неосвещённых дорогах в светлое время суток}} . \quad (1)$$

Дорожное освещение было идентифицировано как фактор, влияющий на количество ДТП, и многочисленные исследования показали, что оно может привести к уменьшению количества ДТП в тёмное время суток (например, [4, 6, 10]). Хорошим примером является исследование, проведённое Международной комиссией по освещению (МКО), которая установила, что дорожное освещение уменьшает количество ДТП в среднем на 30 % [4].

Непрерывно расширяющееся использование интеллектуального освещения [2, 9] стимулировало проведение исследований влияния качества освещения на количество ДТП [12–14], тогда как в [15] было показано, что в настоящее время дорожное освещение обычно характеризуется избыточным уровнем освещения, причём повышенный уровень освещения не обязательно увеличивает безопасность дорожного движения. В [15] связь между уровнем и качеством освещения и количеством ДТП оценивалась исходя из соотношения количества столкновений автомобилей в ночное и дневное время. В результате был сделан вывод, что в настоящее время дороги освещены слишком сильно, и имеется возможность для уменьшения уровней освещения городских магистралей на вплоть до 50 %. В [16] исследовали влияние уменьшения уровня освещения на безопасность дорожного движения и преду-

преждение преступлений, причём полученные результаты не содержат никаких доказательств того, что выключение света, освещение на протяжении только части тёмного времени суток и уменьшение уровня освещения как-то связаны с количеством ДТП в тёмное время суток. Кроме того, не было никаких свидетельств повышения уровня преступности в этих условиях в тёмное время суток. Так что возможность регулирования дорожного освещения без отрицательных последствий для безопасности дорожного движения подтверждена результатами проведённых исследований.

## 3. Осветительная техника

### 3.1. Изменения, произошедшие в осветительной технике

По оценкам Международного энергетического агентства, в 2005 г. 62 % наружного освещения обеспечивали НЛВД и НЛНД, 30 % – ДРЛ, 6 % – МГЛ, а оставшиеся 2 % – главным образом, лампы накаливания и галогеновые лампы накаливания [1].

НЛВД, ДРЛ и МГЛ вместе известны как разрядные лампы высокого давления (РЛВД). В лампах этого типа свет генерирует дуговой разряд. РЛВД каждого типа генерируют свет, характерный для металла, в парах которого происходит дуговой разряд. РЛВД имеют падающую вольт-амперную характеристику и, тем самым, нуждаются в ограничивающем ток устройстве, которым обычно служит пускорегулирующий аппарат. Кроме того, они нуждаются в зажигающих устройствах. Время их разгорания до достижения установленного значения светового потока обычно составляет несколько минут. Для повторного зажигания им часто требуется несколько минут на остывание. Световой поток НЛВД может быть уменьшен до примерно 50 % за счёт уменьшения питающего напряжения. Время групповой замены ДРЛ и НЛВД часто составляет 4 года, что соответствует равному 16000 ч сроку службы этих ламп. Сроки службы НЛНД и МГЛ обычно составляют 12000 ч. Наибольшую световую отдачу (150–170 лм/Вт) имеют НЛНД, тогда как световые отдачи НЛВД, ДРЛ и МГЛ составляют 80–150, 40–60 и 60–90 лм/Вт соответственно. Световая отдача зависит от мощности лампы и её индекса цветопередачи. Например, в случае НЛВД увеличение давления и температуры внутри колбы лампы приводит к увеличению индекса цветопередачи и цветовой температуры и, в то же время, к уменьшению световой отдачи.

Как отмечалось выше, световая отдача НЛВД может достигать 150 лм/Вт [17]. Однако при помещении лампы в светильник КПД светильника приводит к уменьшению результирующей световой отдачи. КПД светильников часто имеют довольно небольшую величину, что особенно верно в случае старых светильников [18]. С учётом КПД светильника и потерь в пускорегулирующем аппарате, световая отдача светильника часто составляет примерно 40 лм/Вт [19]. Сравнение характеристик ламп и светильников разных типов проведено на рис. 1.

В основе НЛВД лежит дуговой разряд, тогда как СД – это полупроводниковые приборы, длина волны излучения которых зависит от полупроводникового материала. В дорожном освещении обычно используются кристаллы, из-

лучающие синий свет, который затем частично преобразуется люминофорным покрытием в более длинноволновое излучение. В спектре СД отсутствует инфракрасное излучение, а выделяющееся в *p-n*-переходе избыточное тепло требуется отводить к радиатору [20]. Без соответствующего радиатора (или вентилятора) температура *p-n*-перехода возрастёт, что приведёт к уменьшению как светового потока, так и срока службы СД. В отличие от разрядных ламп, у СД отсутствуют занимающие несколько минут периоды разогревания и перезажигания. Световой поток формируется сразу же после включения, причём время его нарастания не превышает нескольких микросекунд [21], так что время нарастания светового потока не препятствует использованию СД в схемах с регулированием светового потока. При этом световой поток СД практически линейно зависит от потребляемой мощности, так что световая отдача СД остаётся высокой и в случае светорегулирования.

Светильники с СД очень долговечны, и по данным производителей их эксплуатационный срок службы может составлять от 50 до 100 тыс. ч. Световая отдача светильников с СД уже достигла 100 лм/Вт [22]. Однако в процессе эксплуатации может иметь место деградация полупроводникового материала и люминофорного покрытия, что приводит к уменьшению срока службы, особенно в условиях тёплого климата.

### 3.2. Управление освещением

В области управления дорожным освещением были достигнуты значительные успехи. Управление освещением можно осуществлять в режиме реального времени или в соответствии с составленным заранее алгоритмом. Последний вариант можно назвать интеллектуальным дорожным освещением [12]. Самая распространённая система управления содержит фотоэлектрические элементы, которые включают и выключают свет исходя из уровня естественного освещения. Благодаря своим дешевизне и надёжности, фотоэлектрические датчики могут использоваться как с отдельными светильниками, так и с группами светильников. В настоящее время наиболее широко используемые фотоэлектрические датчики имеют заводскую настройку на включение при уменьшении естественной освещённости на закате до уровня 70 лк и выключение при увеличении естественной освещённости на рассвете до уровня 35 лк. Однако этот рабочий диапазон можно изменить. По оценкам Общества специалистов в области освещения (*Institution of Lighting Professionals*) [23], если уровень освещённости, при котором следует включать или выключать освещение, уменьшить до 35 лк на закате и 16 лк на рассвете, то в год продолжительность работы освещения можно уменьшить на 50 ч (примерно 1–2 %). В случаях ламп старого типа, таких как НЛНД и ДРЛ, использовать эти пониженные уровни включения и выключения не рекомендуется. Как отмечалось выше, этим лампам требуется некоторое время на разогрев до момента выхода их световых потоков на рабочий уровень. Т.к. ДРЛ были запрещены регламентом Евросоюза [24], а имеющие другие характеристики светильники с СД уже готовы занять их место на рынке [2], то в настоящее время рассматривается использование фотоэлементов, включающих и выключающих освещение при 35 и 16 лк соответственно.

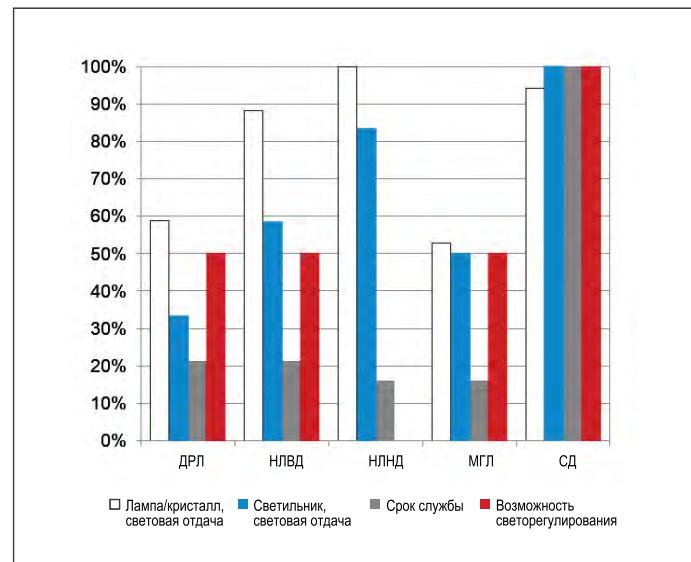


Рис. 1. Характеристики ламп и светильников разных типов. За 100 % приняты: для световой отдачи ламп – 170 лм/Вт (НЛНД), для световой отдачи светильников – 120 лм/Вт (СД), для срока службы – 75000 ч (СД), для возможности светорегулирования – 100 % (СД)

Возможности в части уменьшения уровня или продолжительности работы дорожного освещения или отключения освещения при отсутствии потребности в нём всё ещё не исчерпаны. Например, в периоды низкой интенсивности движения можно для экономии энергии отключать каждый второй светильник, что, однако, приводит к плохой равномерности яркости. Приемлемой альтернативой выключению каждого второго светильника может оказаться регулирование световых потоков светильников. Отслеживание уровня яркости поверхности дороги играет главную роль в регулировании световых потоков установок дорожного освещения. При этом на уровень яркости поверхности дороги могут влиять самые разные факторы, такие как зависящие от погодных условий характеристики поверхности или наличие на дороге света фар автомобилей [12].

Погодные условия оказывают сильное влияние на яркость поверхности дороги. Равномерное снежное покрытие на дороге может привести к существенному увеличению яркости поверхности. Согласно [12], при этом яркость поверхности дороги может составить 150 % от своего значения при сухой погоде.

Фары автомобилей также могут существенно влиять на яркость поверхности дороги. Это было вкратце проиллюстрировано в [12], где отмечалось, что фары автомобилей увеличивали среднюю яркость поверхности дороги на 432 %.

Возможность быстрого регулирования световых потоков светильников с СД позволила начать разработку систем управления, реагирующих на перемещения отдельных участников дорожного движения. Такие системы могут полностью удовлетворить нормативным требованиям при наличии участников дорожного движения, одновременно обеспечивая высокий уровень светорегулирования и энергосбережения в остальное время. В этих случаях максимальный уровень светорегулирования зависит, главным образом, от его приемлемости для местных жителей. Например, в сельской местности приемлемо уменьшение светового потока до 15–30 % от номинального [13].

### 3.3. Фары автомобилей

Переход от традиционного дорожного освещения на освещение светодиодами принесёт, конечно, большую пользу, однако имеется ещё одна возможность уменьшения энергопотребления и соответствующих затрат без негативных последствий для безопасности дорожного движения. Кроме дорожного освещения, у водителей есть ещё и свет фар автомобилей. При этом дорожное освещение и свет фар не дополняют друг друга [25–27]. Если дорожное освещение обеспечивает освещение горизонтальной поверхности дороги, то фары автомобилей освещают находящиеся на дороге вертикальные объекты, и одновременное наличие дорожного освещения и света фар автомобилей приводит к уменьшению контраста находящихся на дороге объектов. В [26] это совместное воздействие было исследовано применительно к различным уровням дорожного освещения при наличии и отсутствии блёскости, создаваемой встречными автомобилями и воспринимаемой водителем припаркованного автомобиля. В основу исследований были положены шкала субъективных оценок видимости водителем автомобиля и значения видимости, рассчитанные в соответствии с моделью Адриана (Adrian) [28]. Дорога, относившаяся к классу M5 по классификации МКО [29], освещалась НЛВД мощностью 100 Вт. В режиме полной мощности напряжение питания было равно 230 В, а световой поток светильника был равен 7532 лм. Кроме режима полной мощности, имелись ещё два уровня, 71 и 49 %, обеспечиваемые при равных, соответственно, 210 и 190 В напряжениях питания. В результате проведённых исследований было установлено, что снижение уровня освещения до 49 %, что соответствовало освещённости, равной 4,5 лк, обеспечивало большую по сравнению с уровнем 100 % (освещённость 8,3 лк) видимость только при работе фар встречных автомобилей в режиме ближнего света и отсутствии создаваемой фарами блёскости, тогда как при работе дорожного освещения в режиме 71 % (5,9 лк) видимость оказалась хуже, чем в обоих других случаях. Кроме того, хотя при работе фар встречных автомобилей в режиме ближнего света и наличии создаваемой фарами блёскости и имели место отличия между разными уровнями дорожного освещения, эти отличия оказались несущественными [26].

Было установлено, что фары автомобилей могут считаться важным аргументом в пользу снижения уровня дорожного освещения. Однако дальность действия фар огра-

ничена, а скорость движения автомобиля может повлиять на эффективность фар (ситуация, когда тормозной путь автомобиля превышает расстояние видимости на дороге, освещаемой фарами). Правило заведомо чистого пространства впереди (*assured clear distance ahead*) означает поддержание скорости на уровне, достаточно малом для того, чтобы водитель мог остановить автомобиль в пределах дальности видимости и, тем самым, избежать столкновения с объектами, которые могут появиться на пути следования автомобиля [30]. Основной принцип этого правила состоит в необходимости определить максимальную скорость безопасного движения, которая, как следует из определения расстояния безопасного торможения (РБТ), непосредственно зависит как от автомобиля, так и от водителя. РБТ зависит от скорости автомобиля, времени восприятия, времени реагирования, коэффициента трения и ускорения свободного падения. Эти параметры зависят как от окружающей среды, так и от опыта, внимательности и физического состояния водителя [30]. Американская ассоциация руководителей государственных шоссейных дорог и транспорта [31] считает 2,5 с тем временем, которое требуется большинству водителей для реагирования в большинстве условий, и эти 2,5 с используются в качестве времени восприятия и реагирования при проектировании дорог. Значения РБТ, соответствующие разным скоростям, говорят о том, что при скорости 50 км/ч фары автомобиля могут обеспечить отвечающую требованиям безопасности видимость на расстоянии до 60 м (принимая в соответствии с [31], что для большегрузных автомобилей коэффициент трения равен 0,65 для сухих условий и 0,38 для влажных условий). Результаты этих теоретических оценок согласуются с результатами предшествующих исследований. Одним из критериев оценки эффективности фар автомобилей с точки зрения обеспечиваемой ими видимости служит расстояние обнаружения при разных скоростях движения. Результаты ряда исследований говорят о том, что при движении с низкой, не превышающей 50 км/ч, скоростью достаточно фар ближнего света [27, 32, 33]. Например, в [32] показано, что при наличии только ближнего света фар достаточная видимость обеспечивается при скоростях до 48 км/ч. Кроме того, известно, что на неосвещённой дороге и при использовании только ближнего света молодые водители могут распознать неожиданного пешехода в тёмной одежде в среднем на расстоянии от 15 до 45 м [30, 33].

На рис. 2 представлены зависимости РБТ от скорости при двух погодных условиях. Так как фары автомобилей доминируют на расстоянии от 0 до 60 м [3], то РБТ не должно превышать 60 м. Как следует из рис. 2, РБТ зависит как от скорости движения, так и от состояния поверхности дороги. Кроме того, движение с высокой скоростью может привести к уменьшению эффективности фар автомобилей (ситуация, когда тормозной путь автомобиля превышает расстояние видимости дороги, освещаемой фарами) и увеличению эффективности дорожного освещения. В [34] исследовалась зависимость расстояния обнаружения небольших препятствий от уровня дорожного освещения при движении с высокой (89 км/ч) скоростью. Полученные результаты продемонстрировали существенные различия между освещением, работающим в режиме полной мощности, и освещением, работающим в других режимах. Наилучшие значения расстояния обнаружения

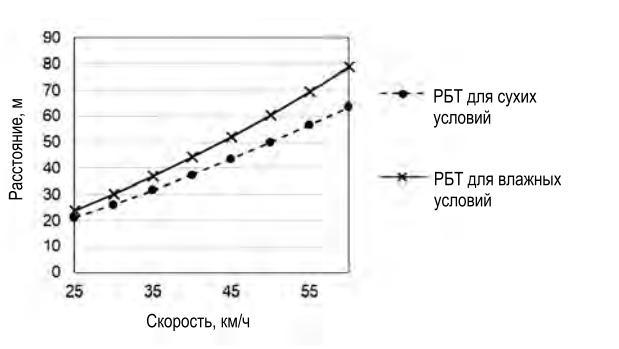


Рис. 2. Расстояние безопасного торможения (РБТ) для разных скоростей и погодных условий

были получены при работе дорожного освещения в режиме полной мощности.

Так что имеется возможность уменьшения энергопотребления в результате учёта совместного влияния дорожного освещения и света фар в случае дорог с низкой скоростью движения или в случае, когда автомобиль приближается с малой скоростью (менее чем 50 км/ч).

## 4. Экологическая безопасность

### 4.1. Потребность в экологически безопасном наружном освещении

Появление СД повлекло за собой глобальное преобразование освещения, при котором СД приходят на смену традиционным средствам освещения, а новые поставщики и организации меняют облик светотехнической отрасли. Переход на СД заставил участников рынка отреагировать на изменяющиеся условия и наличие требований к экологической безопасности и техническим характеристикам новых изделий с СД посредством учреждения новых международных организаций, таких как Всемирная светотехническая ассоциация (*Global Lighting Association*) [36, 37], Европейская светотехническая ассоциация (*Lighting Europe*) [38] и Жага (*Zhaga*) [39, 40]. Эти глобальные изменения были поддержаны общественными и международными организациями посредством разработки новых международных стандартов на испытания изделий с СД и запуска вспомогательных программ. Вся эта деятельность была направлена на ускорение преобразования рынка и международной торговли и внедрение новой СД техники, оказывающей положительное воздействие на устойчивое, экологически безопасное развитие экономики [41, 42].

Однако из всех различных сегментов рынка именно наружное освещение часто оказывается самой регулируемой составляющей инфраструктуры развитых стран. Кроме того, капиталовложения в наружное освещение планируются в долгосрочной перспективе, охватывающей, зачастую, несколько десятилетий [43]. Для того, чтобы соответствовать потребностям владельцев осветительных сетей и участников дорожного движения в функциональном освещении, установки наружного освещения должны удовлетворять определённым критериям, содержащимся в стандартах и рекомендациях Международной комиссии по освещению (МКО), Европейской комиссии по стандартизации (CEN), Американского национального института стандартов (ANSI) и Североамериканского светотехнического общества (IES). Стандарты на дорожное освещение содержат светотехнические требования, включающие в себя требования к яркости, освещённости, равномерности и слепящей блёскости, создаваемым светильниками.

Однако в дополнение к удовлетворению нормативным требованиям, от осветительных установок всё чаще ожидают, что они не будут наносить вред окружающей среде. Это означает, что при выборе технических средств предпочтение следует отдавать изделиям, наиболее благоприятным с экономической, экологической и социальной точек зрения, что является достаточным условием для внедрения эффективных светотехнических изделий. Такой основанный на жизненном цикле подход влечёт за собой оценку того, как изделия ведут себя с точки зрения экологической

безопасности и какие компромиссы или зависимости, если они есть, существуют между различными техническими средствами и связанной с ними опасностью для окружающей среды [44, 45]. Однако оценка экологической безопасности всё ещё находится на стадии разработки, и анализ можно производить, комбинируя различные научные подходы и методы [45]. Применительно к наружному освещению была разработана схема, состоящая из набора показателей и мер экологической безопасности, позволяющих с разных точек зрения оценить долгосрочную экологическую безопасность именно светильников с СД [46]. В рамках этой схемы оценка экологической безопасности производится при помощи формальных индикаторов и методов в сочетании с качественными параметрами обеспечения экологической и социальной безопасности и экономической приемлемости. Кроме того, оценка экологической безопасности и экономической приемлемости может осуществляться с использованием хорошо известных методов, тогда как методы оценки социальных последствий всё ещё не однозначны [44, 47].

### 4.2. Оценка экологической и экономической приемлемости наружного освещения

Экологическую и экономическую приемлемость различных изделий для наружного освещения можно оценить на основе сравнения их характеристик на всех этапах их жизненного цикла с точек зрения вреда, наносимого окружающей среде (оценка жизненного цикла), и затрат за срок службы [48–50]. Внедрение СД в дорожное освещение привело к появлению ряда исследований, посвящённых сравнению экологической и экономической приемлемости новых изделий [51–55]. В основу этих исследований было положено сравнение эффективности новых изделий с СД и повсеместно используемых НЛВД за весь жизненный цикл. Что касается проведения оценок, то в [2] было предложено проводить сравнение исходя из таких ключевых параметров, как мощность светильника, его световая отдача, сроки службы лампы и светильника и расстояние между опорами. В дополнение к этому, в [51] было предложено в качестве функциональной единицы использовать километр освещённой дороги.

Полученные в последнее время результаты говорят о том, что светильники с НЛВД и СД воздействуют на окружающую среду одинаково, и наибольшее воздействие имеет место на стадии эксплуатации светильников: 96 % в случае НЛВД и 87 % в случае СД. Так что отличительной особенностью наружного освещения является то, каким образом различные осветительные приборы воздействуют на окружающую среду во время эксплуатации, т.е. когда освещение включено. В качестве проблемы, присущей различным вариантам освещения и конструкциям светильников, кроме энергопотребления рассматривают ещё и другие факторы, в первую очередь, световое загрязнение, которое можно определить как повышенный уровень искусственного освещения в ночное время [56] и непреднамеренное освещение различных участков [57, 58]. Дорожное освещение может вызвать световое загрязнение, которое проявляет себя как свечение неба и свет, проникающий в пределы частной собственности и, тем самым, нарушающий право владения (*light trespass*) [59, 60]; иными словами, дорожное освещение приводит к увели-

чению яркости ночного неба [61] и наличию непреднамеренно освещаемых участков [62].

Для минимизации этого воздействия были предприняты определённые шаги. Международная ассоциация тёмного неба и Североамериканское светотехническое общество разработали инструменты планирования и выбора подходящего наружного освещения. Эти организации создали для муниципальных органов шаблон постановлений в области освещения [63], который направлен на приведение наружного освещения в соответствие с имеющимися рекомендациями при одновременном сведении к минимуму негативного воздействия на окружающую среду на стадии эксплуатации [2]. Кроме того, этот шаблон дополнен ещё одним инструментом, направленным на минимизацию отрицательного воздействия, оказываемого на окружающую среду на стадии эксплуатации светильников, например, светового загрязнения [64]. Система оценок, предложенная Североамериканским светотехническим обществом, должна помочь при выборе для осветительных установок светильников с подходящим экранированием излучения.

Что касается экономической эффективности светильников с НЛВД и СД, то она также оценивалась неоднократно [2, 52, 55]. Закупочная стоимость светильников с СД часто намного, иногда в несколько раз, превышает стоимость светильников с НЛВД [52, 55], а это создаёт впечатление, что полная стоимость жизненного цикла у первых больше, чем у вторых. Ещё одной причиной экономической неэффективности светильников с СД является их конструкция, которая не обязательно предусматривает возможность замены СД матриц по окончании их срока службы [52]. Это приводит к увеличению затрат на техническое обслуживание светильников с СД на протяжении длительного инвестиционного периода, так как в течение эксплуатационного периода приходится менять светильники в целом.

Однако проведённые в упомянутых исследованиях анализы чувствительности и сценариев показали, что светильники с СД могут оказаться более экономически эффективными, чем светильники с НЛВД [2, 52]. Благодаря развитию светотехнической промышленности вообще и производства светильников с СД в частности, СД стали конкурентоспособной альтернативой НЛВД [2]. Улучшение эффективности жизненного цикла обусловлено проводимыми во всём мире научными исследованиями и разработками в области СД [35] и сотрудничеством промышленности и науки. При этом по мере развития осветительной отрасли она привлекает новых участников рынка, которые используют новые методы создания светильников. Эти новые методы включают себя ускоренное изготовление опытных образцов и использование автоматизированных технических средств производства, таких как роботы. Как следствие, предприятия приобрели возможность быстро апробировать изделия и получать информацию об их первых вариантах, а затем исправлять качество изделий для проведения следующей апробации. Увеличение количества конкурирующих друг с другом поставщиков привело к снижению закупочной стоимости светильников с СД и является основным объяснением улучшения эффективности жизненного цикла этих изделий. С другой стороны, результаты, полученные применительно к жизненному циклу, нельзя считать неизменными, так как они могут зависеть от конкуренции и структуры местного рынка.

Светильник с СД всё ещё способны увеличить свою эффективность, и их можно оптимизировать в части потребления электроэнергии, световой отдачи, модульности и срока службы. Эти усовершенствования сделают изделия с СД более эффективной экономически альтернативой изделиям с НЛВД.

## 5. Будущее дорожного освещения

СД и изделия с ними являются инновационной, быстро прогрессирующей продукцией, которая займёт доминирующее положение в светотехнике. По оценкам Министерства энергетики США, к 2020 г. световые отдачи светильников с СД могут достичь почти 200 лм/Вт [22]. Световая отдача корпусированных СД может оказаться равной 220 лм/Вт, а полный КПД светильника достигнет 89 % (КПД светильника складывается из его термического КПД, КПД устройства управления (93 %), оптического КПД (94 %) и поправочного коэффициента для работы при пониженном значении тока (1,09)). Если сравнивать с современными светильниками с разрядными лампами, то световая отдача светильников для дорожного освещения может в будущем возрасти более чем в три раза. А если воспользоваться предложенной функциональной единицей (километр освещённой дороги), то следует учитывать ещё и распределение силы света светильника, полный световой поток, высоту опор, расстояние между опорами и другие параметры. Как бы то ни было, светильники с СД успешно конкурируют с современными светильниками с разрядными лампами. Требуемое распределение силы света светильника с СД обеспечивается при помощи вторичной оптики, обычно, линз, позволяющей направлять свет на выбранные участки даже эффективнее, чем в случае светильников с разрядными лампами, в которых для направления света используются отражатели.

Преимущества светильников с СД перед светильниками с НЛВД можно просуммировать следующим образом: 1) более высокая световая отдача; 2) больший срок службы источника света; 3) мгновенное зажигание на максимальное значение светового потока и отсутствие задержки при перезажигании; 4) световая отдача не уменьшается при светорегулировании; и 5) светорегулирование не влияет на срок службы источника света [65]. Фактически, уменьшение температуры *p-n*-перехода при светорегулировании приводит к увеличению срока службы.

Данные, приведённые в табл. 1, говорят о том, что использование светильников с СД может привести к уменьшению потребления энергии на 83 % по сравнению со светильниками с НЛВД, тогда как современные светильники с СД обеспечивают уменьшение потребления энергии на 31 %.

Будущее дорожного освещения – это интеллектуальное освещение. Поэтому МКО разработала стандарт на интеллектуальное дорожное освещение, который учитывает внешние факторы, такие как интенсивность движения, остаточный уровень естественного освещения, устройство дороги, ДТП и погодные условия [29]. Разработка стандарта была основана на опыте сооружения 20000 интеллектуальных световых точек, установленных на дорогах Европы (проект *E-street* [14]). По оценкам, замена старых осветительных установок на новые установки с интеллектуальными системами управления позволяет сэкономить

Сравнение источников света [2]

| Источники света |             | Мощность, Вт | Световая отдача, лм/Вт | Световой поток, лм | Годовая продолжительность горения, ч/год* | Годовое потребление энергии, кВт·ч/год | Экономия энергии, % |
|-----------------|-------------|--------------|------------------------|--------------------|---|--|---------------------|
| НЛВД            |             | 175          | 69                     | 12000              | 4000                                      | 700                                    |                     |
| СД              | Современные | 120          | 100                    | 12000              | 4000                                      | 480                                    | 31                  |
|                 |             | 120          | 100                    | 12000              | 2000*                                     | 240                                    | 66                  |
|                 | Перспектива | 60           | 200                    | 12000              | 4000                                      | 240                                    | 66                  |
|                 |             | 60           | 200                    | 12000              | 2000*                                     | 120                                    | 83                  |

\* При наличии интеллектуальных систем управления годовая продолжительность горения уменьшается на 50 %.

38 ТВт·ч электроэнергии в год, что составляет примерно 64 % от годового потребления энергии дорожным освещением. Основанием для проведения этого крупномасштабного пилотного проекта интеллектуального дорожного освещения послужило понимание того, что при малом количестве транспортных средств на дороге уровень освещения может быть уменьшен. В последние годы появилось большое число исследований, результаты которых говорят о том, что водители не нуждаются в высоких уровнях освещения и при большой интенсивности движения, так как их внимание сосредоточено на задней части движущегося впереди автомобиля и в пределах действия фар [12, 13, 25]. Так что освещение, обеспечиваемое фарами автомобилей, позволяет использовать интеллектуальное дорожное освещение не только при отсутствии или низкой интенсивности движения, но и при высокой интенсивности движения. И это никак не сказывается на безопасности дорожного движения.

СД и интеллектуальные системы управления позволяют изменить дорожное освещение таким образом, который приведёт к благоприятным последствиям для экологии. СД увеличивают экологическую безопасность освещения в первую очередь благодаря улучшению эффективности жизненного цикла изделий. Кроме того, экологическая безопасность возрастёт благодаря развивающимся системам интеллектуального освещения, позволяющим оптимизировать освещение, исходя из реальных сиюминутных потребностей участников дорожного движения. Однако мы ещё мало знаем о социальных последствиях дорожного освещения, таких как подавление выработки мелатонина. Возможно, что в будущем появятся рекомендации не только относительно уровня освещения, но и относительно коррелированной цветовой температуры, тем более что в случае СД коррелированную цветовую температуру можно задавать в процессе производства.

## 6. Заключение

Имеющиеся в настоящее время энергетические и экономические трудности приводят к ускорению внедрения в дорожное освещение новой техники. В этой статье проанализированы и объяснены моменты, связанные с широким применением СД и устройств управления в дорожном освещении в будущем. Основными преимуществами применения СД в дорожном освещении являются боль-

шой срок службы источников света, высокая световая отдача и возможность быстрого светорегулирования. В результате система управления освещением может работать в режиме реального времени, исходя из сиюминутных потребностей участников дорожного движения. В настоящее время имеются несколько систем управления, которые обеспечивают экономию электроэнергии. Эти системы управления основаны, главным образом, на отслеживании уровня естественного освещения, интенсивности движения и погодных условий. В периоды низкой интенсивности движения или в случаях, когда дорога покрыта снегом, уровень освещения можно уменьшить. Свет фар автомобилей также оказывает сильное влияние на видимость препятствий на дорогах.

Прогресс в области дорожного освещения и систем управления приведёт к изменению подхода к дорожному освещению. Использование СД и интеллектуальных систем управления обеспечит большую экологическую безопасность дорожного освещения. Дорожное освещение станет более эффективным не только с экономической и экологической точек зрения, но и с социальной точки зрения. В то же время, безопасность водителей и других участников дорожного движения останется на том же уровне, что и в случае традиционных осветительных установок, или даже улучшится.

Это исследование финансировалось Исследовательской программой по энергоэффективности Университета Аалто (проект *Light Energy – Efficient and Safe Traffic Environments*) и Фондом экономического образования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- IEA. International Energy Agency, Light's labour lost: Policies for Energy-efficient Lighting, 2006. [Online]. Available: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/light2006.pdf>. [Accessed 21.07. 2017].
- Tetri, E., Bozorg Chenani, S., Räsänen R-S., Baumgartner, H., Vaaja, M., Sierla, S., Tähkämö, L., Virtanen, J-P., Kurkela, M., Ikonen, E., Halonen, L., Huuprää, H., and Kosonen, I. Tutorial: Road Lighting for Efficient and Safe Traffic Environments // LEUKOS. – 2017. – Vol. 13, No. 4. – P. 223–241.
- Van Bommel, W. Road lighting fundamentals, technology and application. Switzerland: Springer, 2015. 334 pp.
- CIE Commission Internationale de l'Eclairage, Road lighting as an accident countermeasure, CIE. Publication No. 93., Vienna (Austria), 1992.
- Elvik, R. Meta-analysis of evaluations of public lighting as accident countermeasure // Transportation research record (TRR). – 1995. – P. 112–123.

6. Wanvik P. Effects of road lighting: an analysis based on Dutch accident statistics 1987–2006 // Accident analysis and prevention. – 2009. – Vol. 41, No. 1. – P. 123–128.
7. World Health Organization, The top 10 causes of deaths, 2017. [Online]. Available: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs310/en/>. [Accessed 19.08.2017].
8. American Association of State Highway and Transportation Officials., Highway safety manual. 1st ed., 2010. [Online]. Available: <http://aap.knovel.com/hotlink/toc/id:kphsm00002/highway-safety-manual/highway-safety-manual>. [Accessed 22.06. 2017].
9. Assum, T., Björnskau, T., Fosser, S., Sagberg, F. Risk compensation—the case of road lighting // Accident analysis and prevention. – 1999. – Vol. 31. – P. 545–553.
10. Elvik, R., Vaa, T. The handbook of road safety measures. Oxford, U.K.: Elsevier, 2004.
11. Liping, G., Marjukka, E., Halonen, L. Luminance monitoring and optimization of luminance metering in intelligent road lighting control systems // Ingineria Iluminatului. – 2007. – Vol. 9. – P. 24–40.

Полный список литературы (65 наименований) депонирован в редакции



**Саназ Бозорг Ченани (Sanaz Bozorg Chenani).** Окончила Королевский технический институт, Стокгольм, Швеция (2012 г.). Аспирант (Ph.D.) Университета Аалто, Финляндия. Область научных интересов:

дорожное освещение, безопасность и моделирование дорожного движения и управление дорожным движением



**Рами-Самули Рясянен (Rami-Samuli Räsänen).** Окончил Хельсинский университет и Университет Аалто. Аспирант (Ph.D.) Университета Аалто, Финляндия. Область научных интересов: оценка развивающихся технологий и управление устойчивым развитием промышленности с упором на светотехнику



**Эйно Тетри (Eino Tetri), D.Sc.** Окончил Хельсинский технический институт (2001 г.). Область научных интересов: источники света, светодиоды, энергоэффективное освещение, наружное и внутреннее освещение

## МЕЖДУНАРОДНЫЕ ВЫСТАВКИ И КОНФЕРЕНЦИИ В 2018 ГОДУ (II ПОЛУГОДИЕ)

| Дата     | Название мероприятия  | Место проведения  |
|----------|---|---|
| 16–19.04 | <b>Электро 2018</b><br>Международная выставка электротехнического оборудования  |   |
| 17–19.04 | <b>ЭкспоЭлектроника 2018</b><br>Международная выставка электронных компонентов, модулей и комплектующих   | <b>Москва, РФ</b><br><a href="#">exhomap.ru</a>               |
| 17–22.04 | <b>ЭлектронТехЭкспо 2018</b><br>Международная выставка технологий, оборудования и материалов для производства изделий электронной и электротехнической промышленности                         |   |
| 17–22.04 | <b>Eurolice 2018</b><br>Международная светотехническая выставка   | <b>Милан, Италия</b><br><a href="#">exhomap.ru</a>            |
| 18–20.04 | <b>Конференция «Свет в музее»</b><br>Международная конференция, посвящённая вопросам современного освещения музеев и музейных экспонатов  | <b>Санкт-Петербург, РФ</b>                                    |
|          | <b>EXPOLUX 2018</b><br>Международная светотехническая торговая выставка с конференцией  | <b>Сан-Паулу, Бразилия</b><br><a href="#">lightsearch.com</a> |
| 24–28.04 | <b>CIE 2018 Topical Conference on Smart Lighting</b><br>Тематическая конференция, под эгидой МКО, по интеллектуальному освещению с коллеквиумами по цветовому зрению и гигиеничному освещению | <b>Тайбэй (Тайвань/Китай)</b><br><a href="#">cie.co.at</a>    |
| 03–05.05 | <b>INALIGHT 2018</b><br>Индонезийская международная светотехническая выставка   | <b>Джакарта, Индонезия</b><br><a href="#">lightsearch.com</a> |
| 05–05.05 | <b>LEDTEC Asia</b><br>Вьетнамская международная торговая выставка по светодиодам, органическим светодиодам и цифровым медиасистемам   | <b>Хошимин, Вьетнам</b><br><a href="#">lightsearch.com</a>    |
| 06–10.05 | <b>LIGHTFAIR Int'l</b><br>Международная светотехническая торговая выставка  | <b>Чикаго, США</b><br><a href="#">lightsearch.com</a>         |
| 10–12.05 | <b>LED Expo Thailand</b><br>Международная светотехническая торговая выставка  | <b>Бангкок, Таиланд</b><br><a href="#">lightsearch.com</a>    |
| 09–12.06 | <b>Guangzhou Int'l Lighting Exhibition</b><br>Международная светотехническая торговая выставка  | <b>Гуанчжоу, КНР</b><br><a href="#">lightsearch.com</a>       |
| 20–23.06 | <b>Lightovation: Dallas Int'l Lighting Show</b><br>Международная светотехническая торговая выставка («плетня»)  | <b>Даллас (Тех.), США</b><br><a href="#">lightsearch.com</a>  |