

# Новый подход к расчёту экономии энергии для освещения офисных зданий

С. ОНАЙГИЛ<sup>1</sup>, Э. ЭРКИН

Стамбульский технический университет, Стамбул, Турция

## Аннотация

Энергоэффективность систем освещения рассмотрена в соответствующем европейском стандарте *EN 15193* в плане оценки количества энергии, расходуемого на внутреннее освещение зданий. Оценки осуществляются при помощи очень полезного показателя энергоэффективности освещения *LENI*. Хотя для расчёта *LENI* используется очень сложная совокупность данных о здании, этот показатель не даёт ясного представления о возможностях энергосбережения и о системах освещения, которые могут использоваться для экономии энергии. Данное исследование посвящено созданию нового подхода к расчётной оценке возможностей энергосбережения на основе данных для расчёта *LENI*. Модифицировав метод коэффициента использования светового потока, который прост в применении и пригоден для расчёта внутреннего освещения, можно представить установленную мощность в виде аналитической зависимости от коэффициента использования светового потока светильников в помещении и световой отдачи светильника, тогда как остальные нужные сведения, типа размеров помещений и их назначений, могут браться из базы данных для расчёта *LENI*. В итоге предложены новый показатель экономии энергозатрат на освещение, *LESI*, и компьютерное программное обеспечение «*bep/ETA*».

**Ключевые слова:** освещение, энергоэффективность, энергосбережение, *LENI*, *LESI*, офисные здания.

## 1. Введение

Здания содержат энергосистемы для обогрева, кондиционирования, освещения и горячего водоснабжения. Энергия для их работы обычно обеспечивается ископаемым топливом. Значительный расход электроэнергии

на освещение, в первую очередь, наблюдается в коммерческих зданиях. Было много исследований по определению вклада систем освещения в общее энергопотребление. Они показывают, что этот вклад составляет (10–50)% [1–4]. Очевидно, что в этой области можно экономить значительное количество энергии, так как большинство современных систем освещения коммерческих зданий старше 20 лет [5]. В настоящее время улучшение энергоэффективности систем освещения зависит от использования эффективных источников света, эффективных электрокомпонентов и светильников с высокими КПД. Кроме того, внедрение датчиков присутствия и естественной освещённости, равно как и адекватное проектирование освещения, несомненно, обеспечат дополнительную экономию энергии.

Европарламент и Совет Европы 16.12.2002 приняли директиву об энергоэффективности зданий [6], направленную на улучшение энергоэффективности и обеспечение достижения намеченных в Киото целей [7]. Энергоэффективность систем освещения рассмотрена в вышедшем в 2007 г. евроstandarte [8], в котором оговорена методика проведения расчётной оценки количества энергии, расходуемой на внутреннее освещение зданий, и введён учитывающий как естественное, так и искусственное освещение показатель энергоэффективности освещения (*LENI* – *lighting energy numeric indicator*), измеряемый в кВт·ч/(м<sup>2</sup>·год) и используемый в сертификационных целях [8]. Эта методика в основном учитывает сведения о полной установленной мощности системы освещения, геометрии и физических характеристиках помещений, характеристиках естественного освещения и системах управления. Однако, хотя для расчёта *LENI* используется очень сложная совокупность информации о здании и системе его освещения, этот показатель не даёт ясного представления об энергосберегающем потенциале систем

освещения. Так, здание, не удовлетворяющее требованиям по стандарту [9], может иметь меньшее значение *LENI*, свидетельствующее о большей энергоэффективности по сравнению с имеющей место при удовлетворении требований к освещению. С другой стороны, старомодная система освещения с системой контроля присутствия также может давать небольшое значение *LENI*, в то время как модернизация светильников может обеспечивать дополнительную экономию энергии. Так что реальная экономия энергии может рассчитываться путём сравнения установленных мощностей существующей системы и применимой, доступной и реализуемой энергоэффективной системы, удовлетворяющей требованиям к освещению по стандарту [9].

В данном исследовании рассмотрены существующие офисные здания, чтобы разработать методику расчётного поиска возможностей энергосбережения на основе данных, требуемых для расчёта *LENI*. Для этого проведена модификация метода коэффициента использования для получения зависимости установленной мощности от коэффициента использования светового потока светильников в помещении *U* (*room utilisation*) (далее – коэффициент использования  $U^2$ ) и световой отдачи светильника  $e_{lum}$  (*luminaire efficacy factor*), и для различных типов офисных помещений определены значения искомым коэффициентов использования. Кроме того, был предложен новый показатель *LESI* (*Lighting Energy Saving Indicator*) – показатель экономии энергии, расходуемой на освещение), отражающий возможности энергосбережения, и разработано компьютерное программное обеспечение (ПО) «*bep/ETA*» для расчёта на основе данных для расчёта *LENI* значений *LENI* и *LESI*.

## 2. Расчёт энергоэффективности и возможной экономии энергии

Энергоэффективность системы может рассчитываться на основе разности энергий, потребляемых существующей и предлагаемой система-

<sup>1</sup> E-mail: onaygil@itu.edu.tr  
Перевод с англ. Е.И. Розовского.

<sup>2</sup> Авторы используют ещё и коэффициент использования светового потока ламп, что в переводе оговаривается особо. – Прим. пер.

ми. Энергия, потребляемая существующей системой офисного помещения,  $W_L$  может рассчитываться по уравнению из методики расчёта *LENI*:

$$W_L = P_n \cdot [F_C \cdot F_O \cdot (t_D \cdot F_D + t_N)] \quad (1)$$

[кВт·ч],

где  $P_n$  – установленная мощность существующей системы освещения,  $F_C$  – показатель постоянства освещённости (*illumination factor*),  $F_O$  – показатель занятости помещения,  $F_D$  – показатель зависимости от естественного освещения,  $t_D$  – продолжительность работы искусственного освещения при наличии естественного освещения,  $t_N$  – продолжительность работы искусственного освещения при отсутствии естественного освещения.

Согласно уравнению (1), экономия расходуемой на освещение энергии  $W_{LS}$  может определяться на основе  $P_n$  и установленной мощности предлагаемой системы  $P'_n$ . При этом в соответствии с методикой расчёта энергоэффективности освещения экономия энергии, расходуемой на освещение в офисном здании, может быть записана в виде:

$$W_{LS} = (P_n - P'_n) \cdot [F_C \cdot n \cdot F_O \cdot n \cdot (t_D \cdot F_D \cdot n + t_N)] \quad (2)$$

[кВт·ч].

*LESI*, аналогично определению *LENI*, может определяться как экономия энергии, расходуемой на освещение единицы площади всего здания  $A$ :

$$LESI = W_{LS}/A \quad [\text{кВт} \cdot \text{ч}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})]. \quad (3)$$

Основная цель данного исследования – рассчитать искомые значения установленной мощности для разных типов помещений, классифицированных в соответствии с их функциональным предназначением. Для расчёта искомой установленной мощности предлагается воспользоваться методом коэффициента использования, который прост в применении и пригоден для расчётов внутреннего освещения.

### 3. Метод расчёта установленной мощности системы освещения

В методе коэффициента использования светового потока ламп (*UF*) индекс помещения и коэффициенты отражения поверхностей помеще-

ния применяются для определения доли генерируемого светового потока  $\Phi_0$ , попадающего на рабочую плоскость с учётом как потерь в светильнике и помещении, так и коэффициента эксплуатации *MF*, определённого в публикации МКО [10]. Потери рассчитываются исходя из табулированных эмпирических коэффициентов. При помощи *UF* средняя освещённость в помещении заданной площади  $A$  может рассчитываться по формуле

$$E_{ave} = \Phi_0 \cdot UF \cdot MF/A \quad [\text{лк}]. \quad (4)$$

*UF* представляет собой произведение КПД светильника (*LOR*) на коэффициент использования светового потока светильников в помещении  $U$  (далее – просто коэффициент использования), рассчитанный на основе коэффициентов отражения поверхностей помещения, высоты установки светильника и распределения силы света светильников. В то же время  $\Phi_0$  может выражаться как произведение светового потока лампы  $\Phi_L$  на количество ламп в светильнике  $n$  и количество светильников  $N$ . При этом уравнение (4) принимает вид:

$$E_{ave} = N \cdot n \cdot \Phi_L \cdot LOR \cdot U \cdot MF/A \quad [\text{лк}]. \quad (5)$$

Значения  $U$  могут быть представлены в виде табличной зависимости от коэффициентов отражения поверхностей помещения и индекса помещения  $k$ , который можно определить как отношение полной площади горизонтальных поверхностей помещения к полной площади его вертикальных поверхностей. В литературе описано несколько способов табулирования и представления  $U$ , из которых наиболее широко распространён метод МКО.

Для расчёта установленной мощности системы освещения метод коэффициента использования может быть преобразован таким образом, чтобы он позволял получать значение установленной мощности. В принципе, полная установленная мощность системы освещения помещения представляет собой произведение количества светильников  $N$  на мощность одного светильника  $P_{lum}$ , что может записываться как

$$P_n = N \cdot P_{lum} = [\Phi_0 / (n \cdot \Phi_L)] \cdot P_{lum} \quad [\text{Вт}]. \quad (6)$$

С другой стороны,  $e_{lum}$  определяется как частное от деления полного светового потока светильника на его мощность. Так как световой поток светильника равен произведению количества ламп  $n$  на световой поток одной лампы  $\Phi_L$  и на КПД светильника *LOR*, то

$$e_{lum} = n \cdot \Phi_L \cdot LOR/P_{lum} \quad [\text{лм}/\text{Вт}]. \quad (7)$$

Так что

$$P_{lum} = n \cdot \Phi_L \cdot LOR/e_{lum} \quad [\text{Вт}]. \quad (8)$$

Совместив уравнения (4), (6) и (8), получаем выражение для расчёта полной установленной мощности системы освещения заданного помещения:

$$P_n = (E_{ave} \cdot A) / (MF \cdot U \cdot e_{lum}) \quad [\text{Вт}]. \quad (9)$$

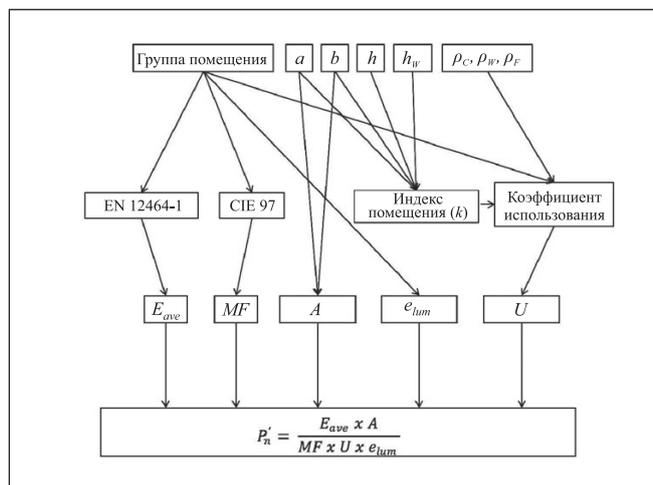
Согласно уравнению (9),  $P_n$  может представляться как функция  $U$  и  $e_{lum}$ , а остальные требуемые сведения (например, размеры и назначение помещения, требуемые уровни освещённости) могут браться из базы данных для расчёта показателя *LENI*. Подобным образом можно рассчитать нормализованную плотность мощности (*NPD*), представляющую собой установленную мощность, приходящуюся на единицу площади и на 100 лк ( $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot 100 \text{ лк})$ ), которая описывается уравнением (10), первоначально записанным для расчёта потребляемой в офисах энергии:

$$NPD = 100 / (MF \cdot U \cdot e_{lum}) \quad [\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot 100 \text{ лк})]. \quad (10)$$

Из вышеприведённых уравнений следует, что определяющими членами являются  $U$  и  $e_{lum}$ . Литературные данные позволяют определять полную установленную мощность системы освещения заданного помещения. Например,  $U$  были теоретически определены [18, 19] для случая, когда общий световой поток нескольких светильников распределён так, чтобы удовлетворять основным требованиям стандарта [9] при, соответственно, равных 0,70; 0,50 и 0,20 коэффициентах отражения потолка, стен и пола. Путём такого теоретического подхода  $U$  может представляться полиномом четвёртой степени от индекса помещения  $k$ .

Теоретические графики  $U$ , несомненно, полезны для расчёта искомых значений этого коэффициента и мини-

Рис. 1. Схема подхода к определению искомой установленной мощности



мальной установленной мощности. Подобный подход позволяет определять плотность мощности, которую можно использовать в светотехнических расчётах, осуществляемых посредством теоретических значений  $U$ . Однако на практике эти теоретические значения недостижимы, так как конструкция светильников призвана ограничивать блёскость и обеспечивать требуемую равномерность. Для достижения практически возможной искомой плотности мощности в помещениях различного назначения их следует группировать по функциональному признаку, и значения  $U$  должны получаться с помощью КСС подходящих типов светильников, выбранных для каждой из групп. Подходящие типы светильников для каждой из групп должны ограничивать блёскость, обеспечивать требуемую равномерность освещения и быть легкодоступными и экономически приемлемыми. Подобным образом можно рассчитать соответствующие установленные мощности систем освещения для всех помещений здания, удовлетворяя при этом критериям по стандарту [9]. Соответственно, на рис. 1 представлена схема подхода к определению искомой установленной мощности для расчётного поиска возможной экономии энергии.

Как следует из рис. 1, основными входными параметрами для расчёта искомой установленной мощности являются: типы помещений, сгруппированные в соответствии с их назначением; геометрические характеристики, такие как длина ( $a$ ), ширина ( $b$ ) и высота рабочей плоскости ( $h$ ), а также коэффициенты отражения потолка ( $\rho_c$ ), стен ( $\rho_w$ ) и пола ( $\rho_f$ ). С другой стороны, необходимо отметить, что

форма помещения считается прямоугольной и что применительно к освещению в качестве рабочей плоскости выступает всё помещение, а не некая целевая зона. Для получения эффективных решений светильники считаются встроенными или установленными на потолки и имеющими прямое светораспределение.

#### 4. Определение искомых значений коэффициента использования

В данном исследовании предполагалось определить реальные искомые значения  $U$  для помещений, которые имеют одинаковое назначение и могут освещаться светильниками сходных типов. Поэтому предполагается группировать помещения зданий в соответствии с их назначением для выбора подходящего типа светильника для каждой из групп. Типы светильников для разных групп должны иметь распределения силы света, позволяющие обеспечивать требуемые уровень и равномерность освещения и ограничивать блёскость, а также иметь необходимые технические характеристики типа степени защиты  $IP$ . Кроме того, эти светильники должны быть доступными и экономически приемлемыми. С учётом этих ограничений были рассмотрены каталоги нескольких производителей светильников, с тем чтобы выбрать подходящие светильники, причём было установлено, что современные светильники с ЛЛ больше подходят для отнесения их к упомянутым группам, так как производство светильников с СД для внутреннего освещения всё ещё не стандартизировано. Светильники с СД всё ещё имеют проблемы

с ограничением блёскости [20] и неприемлемы экономически, тогда как современные светильники с ЛЛ предлагают большое разнообразие оптических характеристик по приемлемым ценам. Поэтому для определения искомых значений  $U$  были выбраны подходящие по светораспределению светильники с ЛЛ. После выбора подходящих светильников для каждой из групп проводятся светотехнические расчёты для обеспечения подходящего светораспределения, в результате чего по методу коэффициента использования определяются значения этого коэффициента.

#### 4.1. Разделение помещений здания на группы

В офисном здании имеется много помещений разного назначения, которым соответствуют разные требования к освещению. Офисные пространства по большей части представляют собой классические офисные помещения, участки движения, такие как коридоры или холлы, и ряд других помещений, таких как технические помещения. В свете этого, помещения офисного здания могут быть разделены в соответствии с их назначением на четыре основные группы:  $G1-G4$ . Эти помещения и нормируемые для них светотехнические параметры представлены в табл. 1.

#### 4.2. Светотехнические расчёты по выбору подходящих светильников

Как следует из табл. 1, помещения каждой из указанных групп могут освещаться одинаковыми светильниками, предназначенными для соответствующей группы. Светильники для каждой из групп должны обеспечивать достаточный уровень освещения и выполнение таких требований к освещению, как равномерность, ограничение блёскости и энергоэффективность. Для выбора соответствующих светильников были проанализированы более 50 каталогов производителей, и в результате для проведения светотехнических расчётов с использованием разных  $k$  и разных уровней освещения были отобраны светильники, позиционируемые как энергоэффективные.

Для проведения светотехнических расчётов по выбору наилучшего для

Классификация офисных помещений по их назначению

Группа	Определение	Функция/Назначение	$E_m$ , лк	UGR	$R_a$
G1	Классическое офисное помещение, в рабочих зонах требуется высокий уровень зрительного комфорта	Помещения для совещаний, классные комнаты, архив, копирование	300	19	80
		Чтение, письмо, обработка данных, помещения для конференций и заседаний, телекс, почта, коммутационный узел	500	19	80
		Здравпункт	500	16	80
		Чертёжная	750	16	80
G2	Участки движения, вестибюли, холлы или пространства, в которых выполняется грубая работа	Входные холлы, комнаты отдыха	100	22	80
		Аварийные выходы или холлы		28	
		Коридоры, приёмные, буфеты	200	22	80
		Лестницы, эскалаторы, раздевалки, ванны комнаты и туалеты, аппаратные, помещения архивов		25	
		Приёмная, справочная, помещения для физических упражнений, демонстрационные помещения, кафетерии	300	22	80
G3	Помещения с высокими требованиями к IP и гигиене	Прачечные	200	25	80
		Кухни	500	28	80
G4	Технические помещения	Гаражи, автостоянки	75	28	40
		Погрузочные эстакады/платформы	150	25	40
		Технические и коммутаторные помещения, кладовые	200	25	60

$E_m$  – нормируемый уровень освещённости; UGR – обобщённый показатель дискомфорта;  $R_a$  – индекс цветопередачи

каждой из групп решения были отобраны следующие светильники: для помещений группы G1 – классические офисные светильники с ЛЛ T8 или T5 и параболическими рассеивателями, которые очень сильно ограничивают блёскость; для помещений группы G2 – светильники направленного вниз света с КЛЛ и зеркальными отражателями; для помещений группы G3 – светильники с ЛЛ T8 или T5 и повышенной степенью защиты, IP 54 или IP 65; для помещений группы G4 – пылезащищённые светильники с ЛЛ и степенью защиты IP 65. Кроме того, учитывалось, что все эти светильники должны быть прямого света и иметь самую современную и стандартизованную конструкцию.

Для того, чтобы охватить все встречающиеся в зданиях геометрические размеры помещений, последние были поделены на малые, средние и большие в соответствии с их  $k$  [21, 22]. В результате  $k$  были приняты равными 0,6–1,0 для малых помещений, 2,0–2,4 для средних и 4,8–5,0 для больших помещений; при этом высо-

та потолка считалась равной 3 м, что типично для офисных зданий. С другой стороны, предполагалось принимать во внимание требуемые уровни освещения помещений разных групп (табл. 1). Так, уровни освещения в 300–500 и 750 лк рассматриваются для помещений группы G1 при малых, средних и больших значениях  $k$ . В результате были рассмотрены 32 разные ситуации, требующие проведения 742 светотехнических расчётов применительно к 16 помещениям и 91 светильнику. В табл. 2 содержится информация о количестве светотехнических расчётов, выполненных для каждой из групп помещений.

Светотехнические расчёты производились с использованием ПО для светотехнических расчётов «Dialux» [23] для разных уровней освещения и геометрий помещений каждой из групп; коэффициенты отражения поверхностей помещений при этом считались равными 0,70; 0,50 и 0,20. Так как светильники с разным светораспределением обеспечивают разные уровни и равномерности освещения и раз-

ные значения обобщённого показателя дискомфорта UGR, то для обеспечения сопоставимости результатов в части оценки энергоэффективности были рассчитаны значения NPD. В результате для каждой из групп были выявлены светильники, способные обеспечивать «среднюю равномерность освещённости» более 0,7 при выполнении требований к ограничению значений UGR. Последние рассчитывались в соответствии с публикациями МКО [24, 25] для наихудшего случая, такого как наиболее неблагоприятное положение наблюдателя и минимальные коэффициенты отражения поверхностей. В результате были отобраны 10 из 30 для G1, 8 из 22 для G2, 6 из 22 для G3 и 4 из 17 светильников для G4 из числа тех, которые могут удовлетворять требованиям к освещению [9] при разных уровнях освещённости и  $k$ .

#### 4.3. Искомые кривые коэффициента использования

Для получения кривых  $U(k, G)$  для выбранных светильников был

Количества светотехнических расчётов, которые следовало произвести для разных групп

Группа, к которой относится помещение	Исследовавшиеся светильники, шт.	Светильники, использовавшиеся при расчётах, шт.	Помещения-примеры, шт.	Общее количество светотехнических расчётов, шт.
G1	58	30	3	270
G2	98	22	6	264
G3	38	22	3	110
G4	33	17	4	98
Всего	227	91	16	742

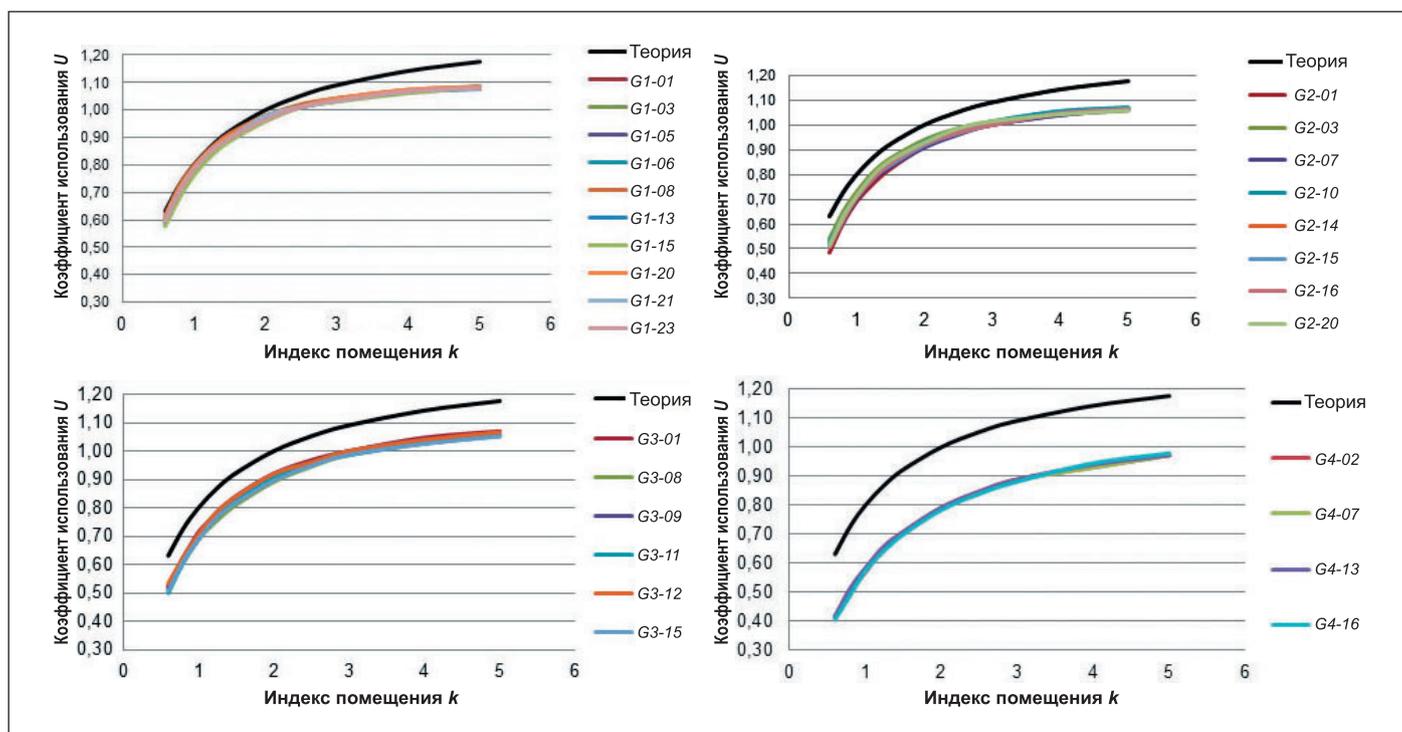
применён метод коэффициента использования МКО. При этом значения  $U$  для каждого из светильников рассчитывались посредством умножения значений  $UF$  на КПД светильника. Полученные значения  $U$  соответствуют такому светораспределению светильника, которое способно удовлетворять требованиям к освещению для всех рассмотренных ситуаций. В результате были получены кривые  $U$  для всех групп, которые могут быть представлены в виде полиномов четвёртой степени от  $k$ . На рис. 2 приведены кривые  $U(k, G)$  при коэффициентах отражения поверхностей помещений 0,70; 0,50 и 0,20; там же представлены и соответствующие теоретические кривые [18].

Как следует из рис. 2, полученные на основе характеристик светильников значения  $U$  очень схожи друг с другом, чего и следовало ожидать, так как входящие в одну и ту же группу светильники имеют светораспределения, способные обеспечивать выполнение требований к освещению. Другой вывод на основе этих кривых – наличие возможности построения одной кривой, которая бы совмещала в себе все остальные, что может быть получено арифметическим усреднением значений  $U$ , полученных для каждой из групп помещений при заданных коэффициентах отражения поверхностей. При этом усреднённые кривые  $U(k)$  представлены в виде зависимости полиномов четвёртой степени от  $k$ . В данном исследовании описы-

вающие  $U$  полиномы были определены для каждой из групп и различных коэффициентах отражения поверхностей. В качестве примера в табл. 3 представлены полиномы четвёртой степени для коэффициентов отражения 0,70; 0,50 и 0,20; при этом коэффициент детерминации  $R^2$  превышает 99,9%. Эти полиномы позволяют получать значения  $U$  при значениях  $k$ , рассчитываемых на основе размеров любых помещений офисного здания.

#### 4.4. Световые отдачи светильников ( $e_{lum}$ )

С учётом полученных в данном исследовании полиномов значение  $U$ , требуемое для расчёта по уравнению (9) установленной мощности, может

Рис. 2. Коэффициенты использования для четырёх групп помещений ( $\rho_C/\rho_W/\rho_F = 0,70/0,50/0,20$ )

**Полиномы, описывающие зависимость коэффициента использования от индекса помещения  $k$  ( $\rho_C/\rho_W/\rho_F=0,70/0,50/0,20$ )**

Группа	Полиномы, описывающие зависимость коэффициента использования $U$ от индекса помещения $k$ ( $y = U$ )	$R^2$
G1	$y = -0,0055 \cdot k^4 + 0,0760 \cdot k^3 - 0,3886 \cdot k^2 + 0,9162 \cdot k + 0,1787$	$R^2 = 0,9993$
G2	$y = -0,0058 \cdot k^4 + 0,0791 \cdot k^3 - 0,4065 \cdot k^2 + 0,9756 \cdot k + 0,0619$	$R^2 = 0,9996$
G3	$y = -0,0048 \cdot k^4 + 0,0670 \cdot k^3 - 0,3537 \cdot k^2 + 0,8817 \cdot k + 0,1038$	$R^2 = 0,9997$
G4	$y = -0,0036 \cdot k^4 + 0,0519 \cdot k^3 - 0,2850 \cdot k^2 + 0,7639 \cdot k + 0,0464$	$R^2 = 0,9998$

Таблица 4

**Относительные погрешности (результаты расчётов в сравнении с результатами по «Dialux»)**

Группа	Индекс помещения	Относительная погрешность, %		
		300 лк	500 лк	750 лк
	$k$	300 лк	500 лк	750 лк
G1	1	0,13	0,82	1,21
	2	3,10	1,39	1,30
	5	4,52*	4,04	1,78
	$k$	100 лк	200 лк	300 лк
G2	0,6	2,72	0,86	-
	0,6	0,10	1,69	6,81*
	1,2	2,19	2,75	2,86
	2,4	-	5,86	3,53
	2	-	-	4,12
	4	-	-	3,61
	$k$	200 лк	500 лк	-
G3	1	0,28	0,88	-
	2	0,39	2,40*	-
	4	-	0,16	-
	$k$	75 лк	150 лк	200 лк
G4	0,6	-	-	1,21
	1,2	-	0,40	2,05
	2,4	2,86*	0,30	1,78
	4,8	2,35	-	-

\* Максимальная погрешность для данной группы

легко определяться по полиному четвёртой степени, соответствующему рассматриваемому помещению и заданным коэффициентам отражения его поверхностей. После получения значения  $U$  требуется только определить входящую в это уравнение  $e_{lum}$ . При этом значения составляют 78,8 лм/Вт для группы G1, 51,3 лм/Вт для группы G2, 62,4 лм/Вт для группы G3 и 66,1 лм/Вт для группы G4. Конечно, эти значения  $e_{lum}$  можно обновлять по мере совершенствования светильников, а также в случае светильников с СД, так как они могут иметь такие же светораспределения как и светильники, использовавшиеся для построения полученных здесь кривых  $U(k, G)$ .

#### 4.5. Подтверждение пригодности

Пригодность уравнений для расчёта установленной мощности проверялась применительно к помещениям, характерным для офисных зданий. Были рассчитаны значения  $NPD$  для всех групп помещений при разных значениях  $k$  и коэффициентах отражения поверхностей 0,70; 0,50 и 0,20. Одновременно значения  $NPD$  были получены посредством ПО «Dialux» для тех же самых условий и 32 разных ситуаций. Относительные погрешности, которые рассчитывались как разности результатов расчётов и моделирования для 32 случаев, представлены в табл. 4.

В результате относительная погрешность превышала 5% лишь в двух случаях (6,8 и 5,9%), составляла 3–5% в четырёх и была ниже 3% в остальных случаях. Можно утверждать, что в связи с приемлемостью относительной погрешности полученные в этом исследовании уравнения позволяют получать разумные результаты.

#### 5. Совмещение со стандартом EN 15193: программное обеспечение «ber/ETA»

Предложенный подход к расчёту возможной экономии энергозатрат на освещение может быть совмещён с приведённой в стандарте [8] методикой расчёта энергозатрат на освещение, так как при расчёте  $LENI$  используется большое количество необходимых данных. Потребность в новом программном обеспечении, позволя-

ющем рассчитывать как энергетические характеристики, так и возможную экономию энергии в конкретном здании, привела к разработке программного обеспечения «ber/ETA», позволяющего рассчитывать значения  $LENI$  и  $LESI$  для существующих зданий.

Для подтверждения правильности как подхода, так и программного обе-

спечения, в «ber/ETA» была заложена информация о реальном здании. Для получения данных для расчёта  $LENI$  и  $LESI$  было выбрано и проанализировано здание муниципалитета района Кадыкёй Стамбула, имеющего 291 помещение общей площадью более 14000 м<sup>2</sup>. Система освещения офисных помещений и коридоров состояла из светильников с четырьмя ЛЛ Т8

Сводка результатов, полученных с помощью программного обеспечения «bep/ETA»

	Существующая ситуация	Сценарий энергосбережения (без управления)	Сценарий энергосбережения (с управлением)
Паразитная мощность, Вт	0	0	5153
Паразитная энергия, кВт·ч	0	0	45138
Установленная мощность освещения, Вт	240959	107180	107180
Расходуемая на освещение энергия, кВт·ч/год	505407	225891	113889
Полное количество электроэнергии, кВт·ч/год	505407	225891	159026
$LENI$ , кВт·ч/(м <sup>2</sup> ·год)	41,5	18,6	13,1
Потенциальное количество сэкономленной энергии, кВт·ч/год	-	271069	345536
Показатель энергосбережения, %	-	53,6	68,4
$LESI$ , кВт·ч/(м <sup>2</sup> ·год)	-	22,3	28,4
Расчётные капитальные затраты, €	-	87600	152566
Расчётный период окупаемости, лет	-	2,9	3,9

мощностью 36 Вт каждая, имеющих призматический рассеиватель и ПРА класса «D».

Значения  $LENI$  при существующей системе освещения рассчитывались по стандарту [8] посредством ПО «bep/ETA», и одновременно в соответствии с изложенным в данной работе подходом производился расчёт значений  $LESI$ . В табл. 5 представлены сводные результаты анализа, проведённого для всего здания в целом.

«bep/ETA» позволяет расчётно определять возможности энергосбережения за счёт применения систем управления. Соответственно, существуют два подхода к обеспечению энергосбережения. Первый состоит в уменьшении установленной мощности, а второй – в применении систем управления везде, где они нужны и реализуемы. Для расчёта количества энергии, сэкономленной благодаря использованию соответствующей системы управления, предполагается на основе базы данных для расчёта  $LENI$  рассчитывать искомые значения коэффициентов  $F_D$  и  $F_O$ , соответствующие максимальному использованию системы управления. Помимо прочего, «bep/ETA» позволяет для предполагаемых значений экономических параметров анализировать ожидаемые капитальные затраты и период окупаемости. Как следует из табл. 5, экономия энергии, которая может достигать-

ся одним лишь снижением установленной мощности, составляет 53,6%, тогда как при наличии дополнительной системы управления освещением она равна 68,4%. В то же время  $LENI$  может снижаться с 41,5 до 18,6 и 13,1 кВт·ч/(м<sup>2</sup>·год) соответственно, а  $LESI$  составит, соответственно, 22,3 и 28,4 кВт·ч/(м<sup>2</sup>·год). С другой стороны, расчётный простой периода самоокупаемости составляет при отсутствии системы управления 2,9 лет, а при наличии – 3,9 лет.

Для подтверждения соответствия нового ПО были отобраны 11 помещений, относящихся к различным группам и занимающих 80% общей площади, для сравнения результатов расчётов, проведённых с помощью ПО «bep/ETA» и «Dialux» (табл. 6).

Оказалось, что эти результаты отлично согласуются между собой. Если говорить о количестве светильников, используемых для расчёта полной установленной мощности, то результаты оказались почти полностью идентичными, за исключением двух ситуаций. Одна в случае офиса с открытой планировкой и  $k = 3,29$ , когда получилось 48 светильников по «bep/ETA» и 49 – по «Dialux», а вторая в случае кладовой с  $k = 3,00$ , когда получилось 44 и 42 светильника соответственно. В обоих ситуациях различия результатов можно считать пренебрежимо малыми.

## 6. Заключение

Показатель  $LENI$  широко используется в ЕС в сравнительном анализе систем освещения по энергоэффективности. С другой стороны, пока нет показателя, который отражал бы энергосберегающие возможности систем зданий. В данном исследовании впервые предлагается показатель  $LESI$ , отражающий реальные возможности в части экономии энергии в офисных зданиях. Для расчёта  $LESI$  была проведена модификация метода коэффициента использования, позволяющая определять зависимость установленной мощности системы освещения заданного помещения от коэффициента использования светового потока светильников в помещении и световой отдачи светильников. Кроме того, помещения типичного офисного здания были разделены на четыре группы в соответствии с их назначением. Искомые кривые коэффициента использования были получены для всех этих групп на основе результатов сотен расчётов, проведённых применительно к энергоэффективным светильникам с учётом требований [9] к освещению. Эти кривые соответствуют светораспределению, способному ограничивать блёскость и обеспечивать требуемую равномерность освещения. В результате были получены уравнения для расчёта иско-

Сравнение результатов светотехнических расчётов, полученных с помощью программных обеспечений «*ber/ETA*» и «*Dialux*»

Определение	Группа	$E_m$ , лк	Коэффициенты отражения ( $\rho_C/\rho_W/\rho_F$ )	Размеры ( $a \times b \times h$ ), м	Индекс помещения ( $k$ )	Результаты по « <i>ber/ETA</i> »		Результаты по « <i>Dialux</i> »	
						К-во св-ков, шт.	$E_m$ , лк	К-во св-ков, шт.	$E_m$ , лк
Личные кабинеты	G1	500	70/50/20	6,6×5,8×2,8	1,58	4	583	4	563
Офис с открытой планировкой	G1	500	70/50/20	9,7×5,7×2,8	1,84	8	560	8	564
Офис с открытой планировкой	G1	500	70/50/20	15×5,7×2,8	2,12	12	559	12	545
Офис с открытой планировкой	G1	500	70/50/20	20×5,8×2,8	2,31	15	522	15	507
Офис с открытой планировкой	G1	500	70/50/20	28×14,5×3,8	3,29	48	500	49	500
Помещение архива	G2	200	70/50/20	2,8×5,7×2,8	0,66	3	234	3	248
Коридоры	G2	200	70/50/20	3×40×2,8	1,00	16	205	16	203
Кафетерий	G2	300	70/50/20	15×20×2,8	4,40	42	325	42	321
Кухня	G3	500	30/30/10	15×8×2,8	2,68	20	517	20	500
Бойлерная	G4	200	30/30/10	10,5×5,5×4	0,85	8	229	8	206
Кладовая	G4	200	30/30/10	25×20×3,7	3,00	44	208	42	227

мой установленной мощности, справедливость которых была с приемлемой точностью подтверждена расчётами с использованием ПО «*Dialux*». Также было разработано новое ПО «*ber/ETA*» для расчёта значений *LENI* и *LESI* и проведён анализ типичного административного здания, результаты которого, полученные с помощью «*ber/ETA*», были подтверждены полученными с помощью «*Dialux*».

В заключение отметим, что описанный в данном исследовании практичный и реализуемый подход к расчётному определению возможностей энергосбережения в освещении совместим с любыми базирующимися на стандарте [8] компьютерными программами для расчёта энергоэффективности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Loftness, V.* Improving Building Energy Efficiency in the U.S: Technologies and Policies for 2010 to 2050 / Proc. workshop "The 10–50 Solution: Technologies and Policies for a Low-Carbon Future". – Washington DC, 2004.
2. *Krarti, M.* Energy audit of building systems: an engineering approach. – 1<sup>st</sup> Ed. – Boca Raton: CRC Press, 2000.
3. *Waide, P., Tanishima, S.* Light's Labour's Lost: Policies for Energy Efficient Lighting / OECD/IEA. – Paris, 2006.
4. EU Action Plan on Energy Efficiency / Commission of the European Communities, Brussels, 2006.
5. *Halonen, L., Tetri, E., Bhusal, P.* Guidebook on Energy Efficient Electric Lighting for Buildings / Aalto University, School of Science and Technology, Department of Electronics, Lighting Unit. – Aalto, 2010.
6. Directive on Energy Performance of the Buildings 2002/91/EC / European Parliament and Council of the European Union, Official Journal of the European Communities. – Brussels, 2003.
7. United Nations Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. URL: <https://unfccc.int>.
8. European Standard (EN 15193), Energy performance of buildings – Energy requirements for Lighting / European Committee on Standardization. – Brussels, 2007.
9. European Standard (EN 12464–1), Light and lighting – Lighting of work places – Part 1: Indoor work places / European Committee on Standardization. – Brussels, 2004.
10. CIE Technical Report No:97, Maintenance of Indoor Electric Lighting Systems / International Commission on Illumination. – Vienna, 2005.
11. CIE Technical Report No:40, Calculations for interior Lighting, Basic method// International Commission on Illumination. – Vienna, 1978.
12. CIE Technical Report No:52, Calculations for interior lighting, Applied method / International Commission on Illumination. – Vienna, 1982.
13. European Standard (EN 13032–2), Measurement and presentation of photometric data of lamps and luminaires – Part 2: Presentation of data for indoor and outdoor work places / European Committee on Standardization. – Brussels, 2004.
14. CIBSE Technical Memoranda 5, The calculation and use of utilisation factors / Chartered Institution of Building Services Engineers. – London, 1980.
15. LiTG Publikation 3.5, Projektierung von Beleuchtungsanlagen nach dem Wirkungsgradverfahren / Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V. – Berlin, 1988.
16. NBDOC Notat 248: Nordic Utilisation Factor Method, A computer program for NB-documentation of luminaires / LTLI, Norway, 1987.

## ЖУРНАЛ ОБРАЩАЕТСЯ

**Мэру Москвы С. С. Собянину**

**Просьба о поддержке журнала «Светотехника»**

(Письмо журнала «Светотехника» от 15.01.2015)

**Глубокоуважаемый Сергей Семёнович!**

Обращаемся к Вам с убедительной просьбой о поддержке старейшего и авторитетнейшего в мире специализированного научно-технического издания – журнала «Светотехника», основанного в 1932 году.

Журнал «Светотехника» систематически осуществляет комплекс публикаций по проблеме энергосбережения в осветительных установках, где расходуется 14% от всей генерируемой электроэнергии. Журнал посвящает свои страницы сохранению зрения людей и, прежде всего, детей и юношества, внедрению наиболее эффективной техники, пропаганде светотехнических знаний. Журнал является трибуной для обсуждения важнейших вопросов светотехнической науки, техники и производства.

Особое место в журнале занимает раздел «Освещение городов», в основном нашей столицы Москвы.

Журнал – единственный научный орган в стране, систематически публикующий материалы по повышению эффективности преобразования электроэнергии в свет.

Журнал имеет дочернее издание на английском языке под названием «*Light & Engineering*», распространяемое во многих странах мира. Журнал «Светотехника» сотрудничает с ВАК РФ и Томсонским институтом в Филадельфии (США).

«Светотехника» и «*Light & Engineering*» признаны Международной комиссией по освещению (МКО) одними из трёх лучших светотехнических журналов мира.

Журнал «Светотехника» – единственный независимый орган печати в нашей отрасли, дающий объективную оценку новой технике и технологии и потому не имеет единого финансирования ни от одной коммерческой фирмы.

Для дальнейшего издания журнала и его развития, учредителем которого является «Редакция журнала «Светотехника», необходимо 17,5 млн рублей.

Очень надеемся на Ваше понимание и поддержку.

С искренним уважением,

**Главный редактор  
Ю. Б. Айзенберг**

**Президент Академии электротехнических наук РФ, член-корр. РАН  
П. А. Бутырин**

**Действительные члены РАН**

**К. С. Демирчян  
А. Н. Диденко  
М. А. Островский, президент Российского физиологического общества**

17. UTE NF C71–12: Méthode simplifiée de prédétermination des éclairage dans les espaces clos et classification correspondante des luminaires / Union Technique l'Electricité, France, 1993.

18. Hanselaer, P., Lootens, C., Ryckaert, W.R., Deconinck, G., Rombautsc, P. Power Density Targets for Efficient Lighting of Interior Task Areas // Lighting Research and Technology. – 2007. – Vol. 39, No. 2. – P. 171–184.

19. Ryckaert, W.R., Lootens, C., Geldof, J., Hanselaer, P. Criteria For Energy Efficient Lighting in Buildings // Energy and Buildings. – 2010. – Vol. 42. – P. 341–347.

20. Erdem, L., Trampert, K., Neumann, C. Evaluation of Discomfort Glare From LED Lighting Systems / Proc. of Balkan Light 2012 Conference. – Belgrade, 2012.

21. Stockmar, A. Luminaire efficiency factor system for general lighting / Proc. Right Light 5 Conference. – Nice, 2002.

22. Ceelen, E. The luminaire efficiency factor for professional luminaires / Proc. Right Light 5 Conference, Nice, 2002.

23. DIALux, Light Building Software. URL: www.dial.com.

24. CIE Technical Report No: 117, Discomfort Glare in Interior Lighting / International Commission on Illumination. – Vienna, 1995.

25. CIE Technical Report No: 190, Calculation and Presentation of Unified Glare Rating Tables for Indoor Lighting Luminaires / International Commission on Illumination. – Vienna, 2010.



**Сэрмин Онайгил  
(Sermin Onaygil),**

Ph. D., проф.

Окончила электротехнический факультет Стамбульского технического университета (СТУ).

Руководитель отдела

планирования и регулирования потребления энергии Энергетического института СТУ.

Президент Турецкого национального комитета по освещению. Председатель технического комитета ТС4–15 МКО



**Эмрэ Эркин  
(Emre Erkin), Ph.**

D. (2012 г.). Окончил электротехнический факультет СТУ.

Научный сотрудник Энергетического института СТУ. Член Турецкого национального

комитета по освещению и технического комитета ТС3–52 МКО