

Экспериментальная проверка достоверности различных моделей определения энергоэффективности ОУ в общественных зданиях¹

И.Е. УЙГУН, Т. КАЗАНАСМАЗ¹, С. КАЛЕ

Измирский технический университет, Измир, Турция
Email: tugcekanasmas@iyte.edu.tr

Аннотация

Целью этого исследования было построение и проверка достоверности модели, получившей название *OptimLUM* (оптимизация расположения светильников), предназначенной для определения наиболее благоприятных местоположений, количества и типа искусственных источников света, обеспечивающих требуемую среднюю освещённость и максимальную равномерность освещённости в офисе. *OptimLUM* реализована при помощи таблицы *Excel* и использует программу *Evolver*, в основе которой лежит генетический алгоритм, позволяющий решить задачу оптимизации. Для проверки надёжности предложенной модели, после проведения измерений освещённости в реальном офисе были сформированы два сценария расположения светильников двух типов, а для проверки применимости предложенной модели значения освещённости, полученные при помощи *OptimLUM*, были статистически сопоставлены с результатами измерений и расчётов в программе *DIALux*. Во всех рассмотренных случаях модель позволила с высокой точностью определить местоположения светильников: значения коэффициента детерминации R^2 и коэффициента вариации CV составили, соответственно, 86–99 % и 0,04–0,12. Эти результаты ближе к результатам измерений, чем результаты расчётов в программе *DIALux*.

Ключевые слова: расположение светильников, оптимизация, офисы, искусственное освещение.

1. Введение

Проектирование освещения рабочих зон представляет собой сложную задачу, включающую в себя много-

численные критерии, в основе которых лежат разнообразные физические и психологические соображения [1]. Людям необходимо обеспечить комфортные и здоровые условия для работы, и при этом они должны работать в энергоэффективных зданиях. Значительная часть энергопотребления офисных зданий приходится на искусственное освещение [2, 3]. Проектирование установок искусственного освещения офисных, равно как и любых других, зданий предполагает учёт количественных и качественных характеристик освещения [4]. Этими характеристиками являются освещённость, равномерность освещённости и расположение светильников. Проектировщики освещения выбирают типы ламп и светильников на основе значений этих характеристик, полученных в результате математического моделирования осветительной установки. В программах, таких как *DIALux*, *Relux* или *Radiance*, используются одновременно и методы расчёта технических характеристик, и архитектурная визуализация. Эти программы хорошо помогают проектировщикам в их работе, позволяя оценить варианты расположения светильников [1, 5, 6]. Однако они не позволяют получить очень точное или оптимальное расположение светильников, не зависящее от конфигурации сетки или без участия пользователя. Нет никакого эффективного механизма поиска, позволяющего подтвердить или отвергнуть возможные решения или выводы проектировщиков, которые потенциально способны обеспечить наилучшую работу осветительной установки. Для этого при помощи практических методов оптимизации, таких как генетические, эвристические, метаэвристические и др. алгоритмы, необходимо предложить оптимальное и альтернативные решения, позволяющие максимизировать

комфорт и минимизировать энергопотребление.

Определению расположения светильников посвящён целый ряд исследований. В [4] был предложен новый метод визуализации и выбора положений светильников, который получил название *Phi-array*. Для расчёта освещённости в контрольных точках сетки авторы использовали программу *Radiance*. Такая же сетка использовалась и применительно к расположению источников света. Моделирующая программа позволила получить значения освещённости как на горизонтальных, так и на вертикальных поверхностях. Эти трёхмерные данные оценивались при помощи генетического алгоритма для процесса оптимизации. Исследователи продолжают разрабатывать и использовать разные методы, проверяя их на предмет надёжности. В [7] был представлен новый метод определения местоположений светильников, обеспечивающий удовлетворительную освещённость и наименьшее энергопотребление. Для решения этой задачи авторы воспользовались обобщённым экстремальным алгоритмом оптимизации (*generalized extremal optimization algorithm*), и этот метод позволяет получить набор вариантов расположения светильников. В ещё одном исследовании был предложен основанный на нечёткой логике регулятор, позволяющий учесть изменения естественного освещения, перемещения пользователей и требования по обеспечению комфортности освещения. Было проведено тестирование этого регулятора посредством измерения освещённости, создаваемой в офисе осветительной установкой [8]. В [9] была представлена новая программа расчёта естественной освещённости внутри зданий. Эта программа, получившая название *INLUX*, была проверена посредством сравнения рассчитанных с её помощью значений освещённости с результатами измерения освещённости в рамках модели с масштабом 1:5. Существует большое количество способов проверки достоверности новых предложений в области освещения, и основной задачей данного исследования является оценка точности осуществляемых в программе *OptimLUM* расчётов внутренней освещённости посредством сравнения результатов расчётов и измерений. При этом применимость и достоверность

¹ Перевод с англ. Е.И. Розовского

модели оптимизации, получившей название *OptimLUM*, были оценены посредством сравнения результатов расчётов, проведённых в этой программе, как с результатами измерений, так и с результатами расчётов в программе *DIALux*. Процесс проверки достоверности включает в себя получение аппроксимирующих прямых на диаграммах рассеяния, позволяющих сравнить измеренные значения освещённости и значения освещённости, рассчитанные при помощи предложенной модели для разных вариантов расположения светильников, и определить тесноту их связи. Были также рассчитаны значения коэффициента детерминации R^2 , среднеквадратического отклонения (*RMSE*) и коэффициента вариации *CV*.

2. Применение предлагаемой модели *OptimLUM*

В этом разделе описан процесс формирования модели оптимизации, обеспечивающей возможность расчёта освещённости и её равномерности с целью получения наилучшего расположения светильников. Описаны формирование пользователем файла данных, содержащего характеристики рассматриваемого помещения и выбранного светильника, и методика проведения расчётов, позволяющая получить оптимальное решение.

2.1. Формирование пользователем файла данных

Процесс проектирования осветительной установки можно упростить за счёт правильного определения местоположений светильников, позволяющего избежать несбалансированное распределение освещённости при выборе для освещаемого пространства подходящего источника света [10]. Пользователь должен занести в таблицы *Excel* основные сведения о светильнике, размерах офиса и его поверхностях. Модель была разработана применительно к *Excel*. Информация об офисе состоит из размеров помещения (высота, ширина и длина) и коэффициентов отражения поверхностей стен, потолка и пола. Для пользователей *OptimLUM* была сформирована база данных о светильниках для офисов, позволяющая без труда выбирать тип светильника. Эта база данных включает в себя световые потоки

и другие фотометрические характеристики светильников разных производителей. Фотометрические данные не только включают в себя пространственное распределение силы света светильника, которая зависит от меридионального (γ) и экваториального (C) углов, но и позволяют рассчитать освещённость.

2.2. Порядок расчёта

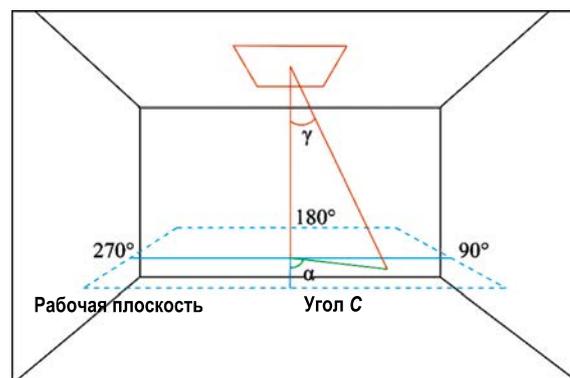
Основным показателем зрительного комфорта является освещённость. Расчёт освещённости можно производить при помощи определённого набора математических операций, описывающих распространение света и позволяющих получить должным образом освещённое пространство. Эти математические расчёты помогают проектировщикам выбрать расположение источников света. Одним из способов проведения расчётов является точечный метод, позволяющий определить освещённость в любой точке рассматриваемой поверхности [11]. Другим показателем является равномерность освещённости, позволяющая оценить изменение освещённости в пределах рассматриваемого пространства. Для облегчения реализации *OptimLUM* при разных размерах помещения и для разных светильников расчётные формулы были запрограммированы на *Visual Basics (VBA)*. Первый этап состоит в формировании на рабочей плоскости и потолке сеток для указания расчётных точек и точек размещения светильников. Координаты этих точек по осям x , y и z определяют посредством расчёта арифметического среднего от длины и ширины помещения. Расчётные точки и точки размещения светильников располагают не ближе чем 0,46 м от поверхностей стен. Для расчётных точек размер ячейки сетки был выбран равным 400

х 600 мм. При проведении расчётов мебель во внимание не принимается, так как в большинстве случаев её расположение не остаётся неизменным. Основное значение для определения равномерности освещённости и средней освещённости имеет освещённость на рабочей плоскости. Так что модель сформирована в приближении пустого офиса. В офисах обычно используют подвесные потолки с размером плиты 600 х 600 мм. По этой причине размер ячейки сетки точек размещения светильников был выбран равным 600 х 600 мм, а архитектурные особенности пространства обусловили выбор встраиваемых модульных светильников. Эти несогласованные сетки использовались для определения вклада в неравномерность освещённости излучаемого под разными углами света светильников. Результатом выполнения этого этапа были значения углов γ и C для линий, соединяющих расчётные точки и точки размещения источников света. При этом C – это угол между расчётной точкой и проекцией источника света на горизонтальную расчётную плоскость, а угол γ измеряется в вертикальной плоскости (рис. 1).

Модель предоставляет возможность изменять размеры сеток и расстояние сеток от стен, так что есть возможность рассмотрения имеющих другие размеры светильников, например, линейных светильников. Местоположение светильника относительно расчётной точки определяется углами γ и C .

На результаты расчёта освещённости точечным методом влияют две составляющие, а именно, прямая и отражённая освещённость. Прямую горизонтальную освещённость, которая формируется в результате непосредственного попадания в рассматриваемую точку излучения источника света, рассчитывают по формуле [12]:

Рис. 1. Углы γ и C между расчётной точкой и точкой расположения источника света



$$E_h = \frac{\left(\frac{\Phi}{1000}\right) X I_{rel} X \cos^3 \alpha}{h^2}, \quad (1)$$

где E_h – прямая горизонтальная освещённость, лк; Φ – полный световой поток светильника, лм; I_{rel} – приведённая сила света светильника в направлении рассматриваемой точки, зависящая от углов γ и C , кд/кЛм; h – вертикальное расстояние между лампой и рассматриваемой точкой, м; α – угол между горизонтальной плоскостью и линией, соединяющей светильник и рассматриваемую точку, град.

Применив эту формулы ко всем расчётным точкам, можно получить полное распределение прямой освещённости в рассматриваемом пространстве.

Отражённую освещённость, которая формируется в результате отражения света от различных поверхностей, рассчитывают по формуле:

$$E_{ind} = \frac{\Phi}{\sum F_n} \times \frac{\rho_{avg}}{1 - \rho_{avg}}, \quad (2)$$

где E_{ind} – отражённая освещённость, лк; Φ – световой поток, излучаемый светильником, лм; $\sum F_n$ – суммарная площадь всех поверхностей помещения, м²; ρ_{avg} – усреднённый по всем поверхностям коэффициент отражения. Значение ρ_{avg} рассчитывают по формуле:

$$\rho_{avg} = \frac{\sum \rho_n F_n}{\sum F_n}, \quad (3)$$

где ρ_n – коэффициент отражения поверхности n ; F_n – площадь поверхности n .

Для понимания различий в освещённости на поверхности большое значение имеет равномерность освещённости. Из-за наложения распределений силы света или провалов в этих распределениях предлагаемые варианты освещения могут привести к образованию на горизонтальной плоскости ярких и тёмных участков. Неравномерное распределение света может привести к возникновению блёскости, когда яркость одного из участков внутреннего пространства помещения оказывается выше средней яркости в помещении [13]. Равномерность

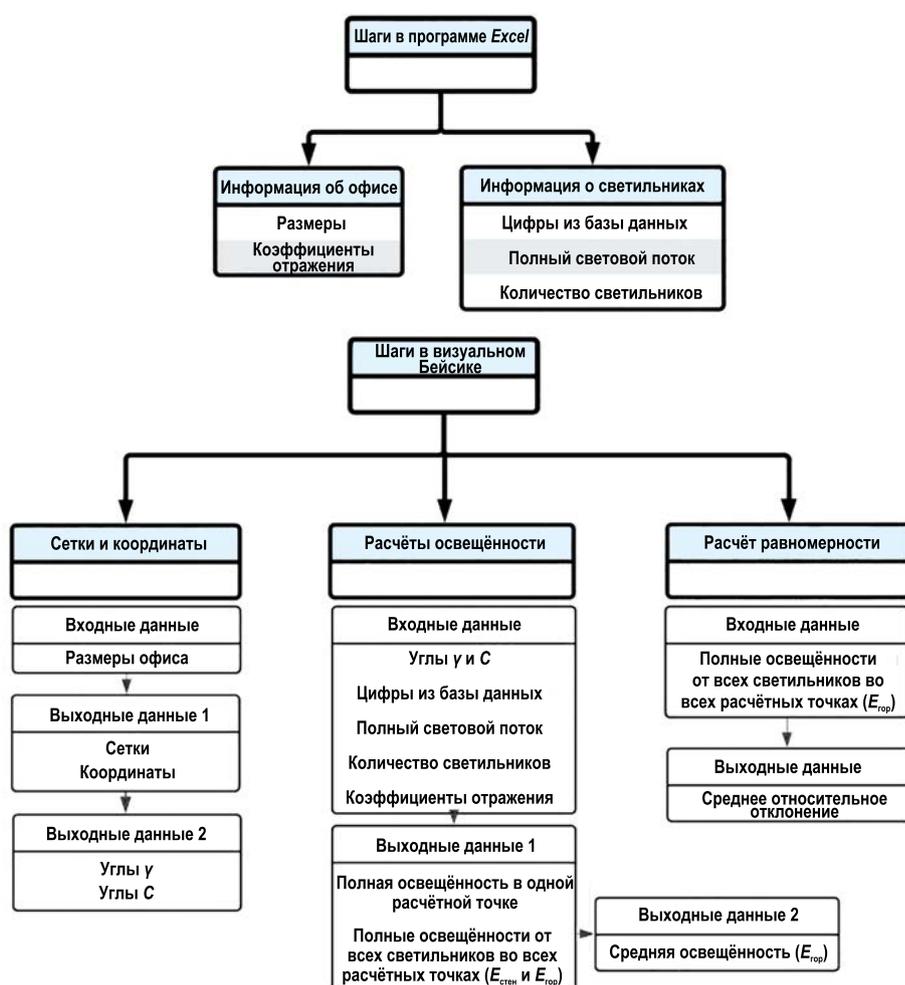


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчёта

освещённости обычно определяют как отношение минимальной освещённости к её среднему значению. При этом это отношение является обобщённым показателем, дающим представление о сбалансированности освещённости. Для оценки колебаний освещённости можно воспользоваться средним относительным отклонением (*MRD*) значений освещённости в разных точках от средней освещённости в пределах рассматриваемого пространства [12, 14]:

$$MRD = \frac{\sum_{i=1}^N |E_i - E_{avg}|}{N \cdot E_{avg}}, \quad (4)$$

где E_i – освещённость в точке i , E_{avg} – средняя освещённость, N – количество точек.

3. Оптимизация

Оптимизацией называют процесс поиска наиболее приемлемого решения задачи, имеющей большое количество возможных решений. Для оп-

тимизации использовалась программа *EVOLVER6 (ADD-INS for Excel)*, предназначенная для решения нелинейных задач оптимизации с использованием таблиц *Excel* [15]. В программе *Evolver* для получения наилучших решений любых задач принятия решений и планирования используется генетический алгоритм, представляющий собой метод оптимизации, основанный на принципах естественного отбора, а также на *OptQuest Engine*, включающем в себя метаэвристический метод математической оптимизации, и элементах нейронной сети.

Модель оптимизации включает в себя большое количество переменных, выбираемых с учётом многочисленных целевых функций и ограничений. При этом определяют все возможные точки размещения светильников, значения освещённости во всех расчётных точках и равномерность освещённости (*MRD*), которые используются в качестве основных входных данных модели оптимизации. Основной целью данного исслед-

дования являлось получение наиболее близкой к нулю описываемой формулой (4) равномерности освещённости на рабочей плоскости (0,8 м от уровня пола), что соответствует минимальному разбросу значений освещённости во всех расчётных точках [16]. При этом имеется жёсткое ограничение, состоящее в том, что значения освещённости должны лежать в интервале от 300 до 500 лк [16]:

$$300 \text{ лк} \leq E_{avg} \leq 500 \text{ лк.} \quad (5)$$

Местоположения светильников задаются переменными $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), \dots, (x_n, y_n, z_n)$, а минимизируемой величиной является MRD . Блок-схемы алгоритма расчёта и процесса оптимизации приведены, соответственно, на рис. 2 и 3.

4. Экспериментальная проверка достоверности модели *OptimLUM*

В качестве объекта для проверки точности выходных данных модели, а именно, значений освещённости, было выбрано реальное офисное помещение Измирского технического университета, Турция, имеющее размеры $5,33 \times 3,32 \times 2,9$ м. Коэффициенты отражения стен, пола и потолка были определены при помощи яркомера и приведённой ниже формулы [17]:

$$\rho_s = \rho_{white} \frac{L_{surface}}{L_{white}}, \quad (6)$$

где ρ_s – коэффициент отражения поверхности, ρ_{white} – коэффициент отражения белой поверхности, $L_{surface}$ – яркость рассматриваемой поверхности, L_{white} – яркость белой поверхности. В результате проведённых измерений были получены следующие значения коэффициентов отражения, соответственно, стен (ρ_{wall}), потолка ($\rho_{ceiling}$) и пола (ρ_{floor}): 0,37; 0,60 и 0,27.

Для проверки были выбраны два разных типа светильников: со светодиодами (СД) и с люминесцентными лампами (ЛЛ). Световой поток светильника с СД был равен 3700 лм, тогда как световой поток светильника с ЛЛ был равен 3780 лм. Прогон программы *OptimLUM* был осуществлён дважды после предварительного задания сетки точек размещения светильников и сетки точек измерений.

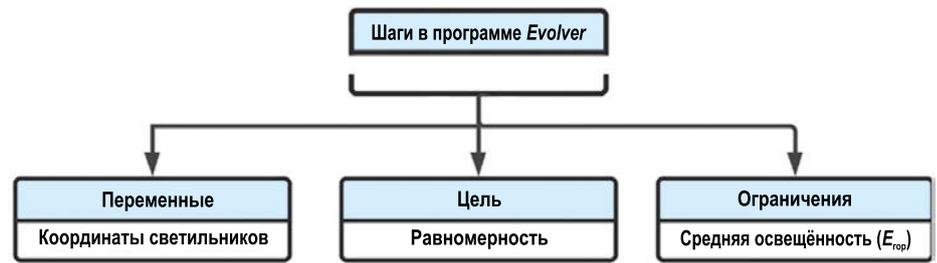


Рис. 3. Блок-схема процесса оптимизации

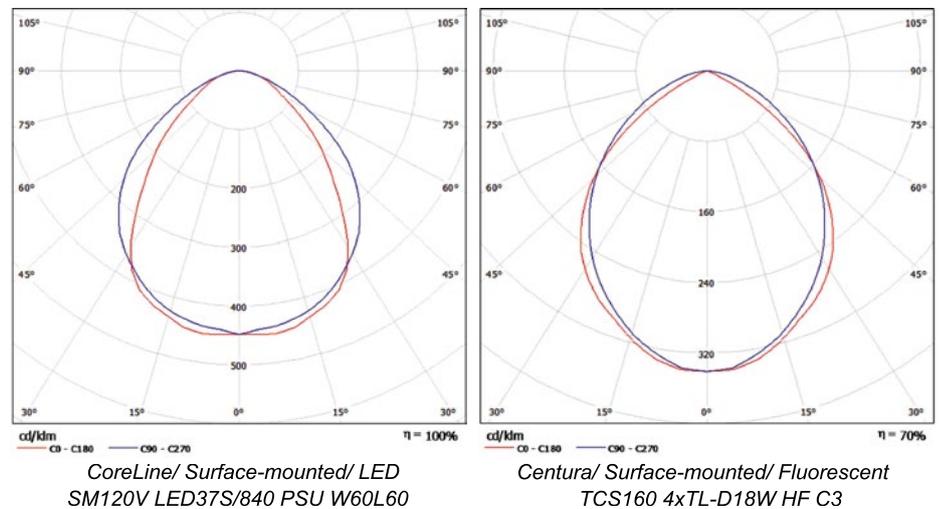


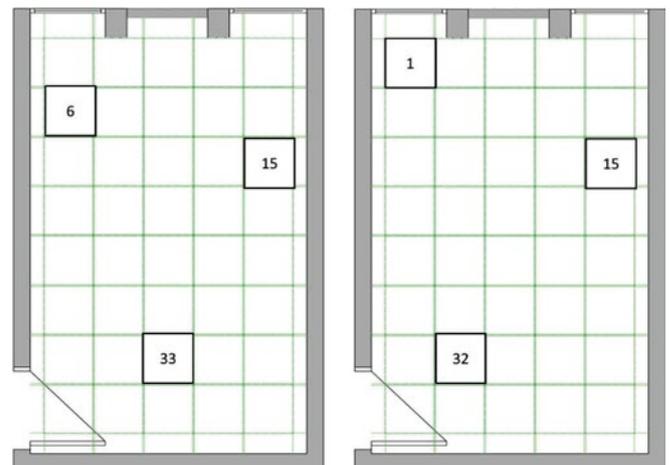
Рис. 4. Листы данных для светильников с СД (слева) и ЛЛ (справа)

Первая сетка, предназначенная для определения местоположений светильников, состояла из 40 отдельных точек, тогда как вторая сетка включала в себя 60 точек, в которых с использованием листов данных для светильников (рис. 4) рассчитывались значения освещённости (друг за другом на каждой итерации).

Местоположение каждого из источников света обозначалось номером, начиная с верхней левой ячейки сетки (№ 1) и заканчивая нижней правой ячейкой сетки (№ 40). Используя совместно эти две сет-

ки, целевые функции и ограничения, *OptimLUM* сформировала 22359 возможных сценариев установки светильников с СД, причём 19626 из них относились к категории «удачные», в которую входили и 2359 лучших сценариев. Для светильников с ЛЛ *OptimLUM* сформировала 22483 возможных сценариев, из которых 11507 из них относились к категории «удачные», включавшую в себя и 9691 лучших сценариев. Время, затрачивавшееся на получение оптимального решения, составило, соответственно, 809 и 814 с. В качестве программы

Рис. 5. Полученное с помощью программы *OptimLUM* расположение светильников с СД (слева) и ЛЛ (справа)



оптимизации для получения решений применительно к светильникам обоих типов использовалась программа *OptQuest Engine*.

Модель позволила выявить два оптимальных расположения светильников при использовании трёх светильников с СД или трёх светильников с ЛЛ, обеспечив при этом минимальное отклонение от равномерности и удовлетворение требований к средней освещённости (рис. 5).

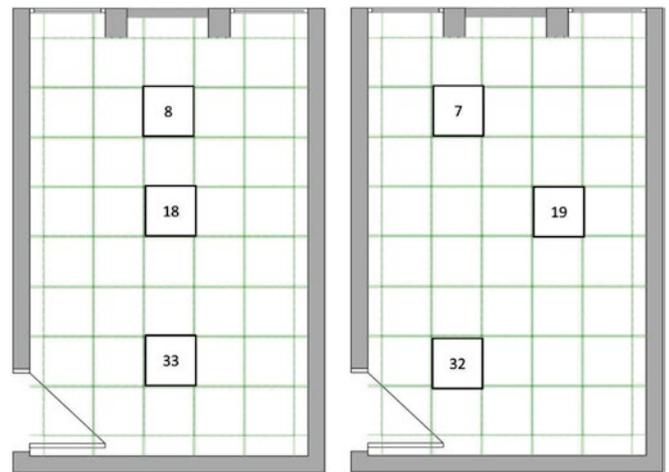
4.1. Проверка правильности алгоритма расчёта

4.1.1. Сценарии расположения светильников для проведения измерений и моделирования (в программе *DIALux*)

Помимо расположений светильников, полученных при помощи *OptimLUM*, для проверки правильности осуществляемых в программе *OptimLUM* расчётов освещённости и оптимизации были предложены ещё два варианта расположения светильников, применительно к которым было проведено сравнение результатов определения освещённости и равномерности освещённости (рис. 6). Один набор из этих трёх расположений был проанализирован применительно к светильникам с СД, а другой – применительно к светильникам с ЛЛ.

Помимо вышеупомянутых вариантов расположения трёх светильников, для определения вклада каждо-

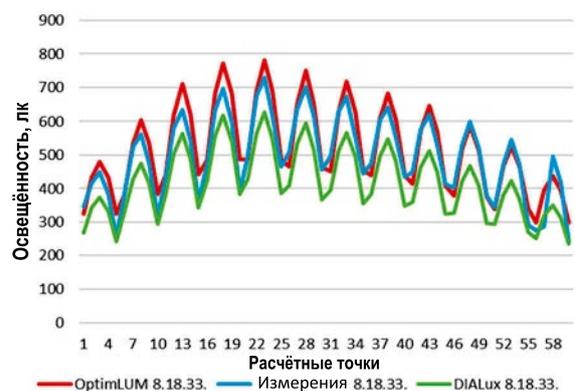
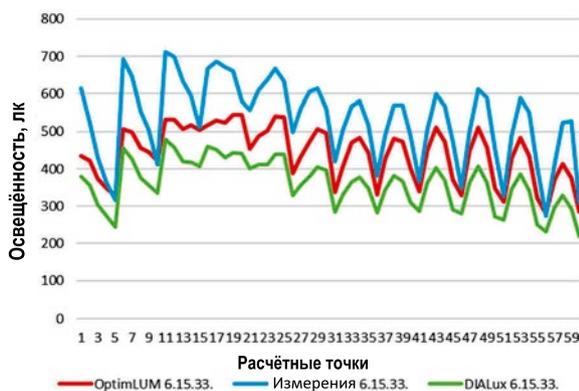
Рис. 6. Альтернативные варианты расположения светильников с СД и ЛЛ: слева – вариант I, справа – вариант II



го из светильников в освещённости в разных точках измерения и проверки правильности использовавшегося в *OptimLUM* алгоритма расчёта освещённости были рассмотрены и схемы расположения одного и двух светильников. На стадии измерений освещённости, создаваемые одним и двумя светильниками на рабочей плоскости (на высоте 0,8 м от уровня пола), определяли при выключенных на время остальных светильниках. По окончании этого процесса 36 конфигураций были смоделированы в программе *DIALux*. Кроме того, значения освещённости были дополнительно рассчитаны и в программе *OptimLUM* (табл. 1). Координаты точек сетки, полученные при помощи программы *OptimLUM*, использовались для фиксации как точек измерения освещённости, так и расчётных точек при проведении моделирования.

4.1.2. Статистическая оценка результатов измерений, моделирования и расчётов в программе *OptimLUM*

Цель проведения измерений освещённости и моделирования в программе *DIALux* состояла в проверке предложенного метода расчёта освещённости и подтверждении правильности определяемого при помощи программы *OptimLUM* расположения светильников посредством сравнения полученных значений освещённости и её равномерности. Сравнение распределений освещённости, полученных применительно ко всем сценариям, проводилось с использованием линейных диаграмм. Было установлено, что результаты расчётов в программе *OptimLUM* ближе к результатам реальных измерений, чем результаты, полученные при помощи про-



СД, расположение <i>OptimLUM</i> (6.15.33)				
	Мин.	Макс.	Средн.	σ
<i>OptimLUM</i>	279,92	545,22	441,72	73,17
Измерения	273,90	713,00	532,55	108,25
<i>DIALux</i>	220,00	480,00	360,63	64,47

СД, вариант I (8.18.33)				
	Мин.	Макс.	Средн.	σ
<i>OptimLUM</i>	297,67	780,40	518,10	128,26
Измерения	241,40	730,00	495,63	120,87
<i>DIALux</i>	234,00	628,00	418,27	101,28

Рис. 7. Распределение освещённости при разном расположении светильников с СД: слева – *OptimLUM*, справа – вариант I (σ – среднеквадратическое отклонение)

Количество сценариев

	Количество светильников	OptimLUM	Вариант I	Вариант II
Светильники с СД	Один	3	2	2
	Два	3	3	2
	Три	1	1	1
Светильники с ЛЛ	Один	2	2	2
	Два	3	3	3
	Три	1	1	1

граммы *DIALux*. Если сравнить минимальные, максимальные и средние значения освещённости и среднеквадратичные отклонения, полученные для светильников с СД применительно к расположениям светильников, соответствующих рассчитанному в программе *OptimLUM* и варианту I (рис. 7), то видно, что результаты расчётов в программе *OptimLUM* несколько превышают результаты, полученные в программе *DIALux*, причём и те, и другие оказались ниже измеренных значений этих параметров. Как следует из рис. 7, в случае рассчитанного в программе *OptimLUM* расположения светильников расхождения между результатами расчётов в программах *OptimLUM* и *DIALux* и результатами измерений оказались несколько большими, чем в случае варианта I. В то же время, в случае светильников с ЛЛ результаты расчётов в программе *OptimLUM* в целом очень хорошо согласуются с результатами измерений.

Подтверждение правильности модели *OptimLUM* осуществлялось при помощи диаграмм рассеяния, на которых проводилось сравнение результатов расчётов в программе *OptimLUM* и экспериментальных данных. Значения коэффициента детерминации R^2 и линейные уравнения регрессии определяли в программе *Excel*. Было установлено, что модель обеспечивает высокую точность расчётов освещённости ($R^2 = 86 \div 99 \%$) (рис. 8–10). Самое высокое значение коэффициента детерминации, равное 99 %, наблюдалось в случае, когда расположение одного светильника было рассчитано при помощи программы *OptimLUM*. (рис. 8). Среднеквадратическое отклонение (*RMSE*), служащее мерой различий между выходными данными, рассчитывают по формуле:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N (o_t - m_t)^2}{N}}, \quad (8)$$

где o_t и m_t – рассчитанное при помощи программы *OptimLUM* и, соответственно, измеренное значения освещённости в расчётной точке t , N – количество расчётных точек. Вообще-то, величина среднеквадратического отклонения изменяется в пределах от 17,88 до 102,90 лк. Наименьшие, лежащие в пределах от 17,88 до 18,40 лк, значения *RMSE* также имели место в случае одного светильника, местоположение которого было определено при помощи программы *OptimLUM*. Хотя все полученные при помощи модели результаты согласуются с результатами измерений с очень большим значением коэффициента детерминации, наилучший, с минимальным значением *RMSE*, результат был получен применительно к варианту с одним светильником. Ещё одним статистическим показателем погрешности, позволяющим оценить надёжность полученных результатов, служит нормализованная среднеквадратическая погрешность (*NRMSE*), которую можно рассчитать по формуле

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N (o_t - m_t)^2}{N}}}{o_{max} - o_{min}}, \quad (9)$$

где o_{max} и o_{min} – максимальное и, соответственно, минимальное значения освещённости, рассчитанной в программе *OptimLUM*. Полученные применительно ко всем конфигурациям низкие значения *NRMSE* (0,04 ÷ 0,08) говорят о достоверности *OptimLUM* (рис. 5–8).

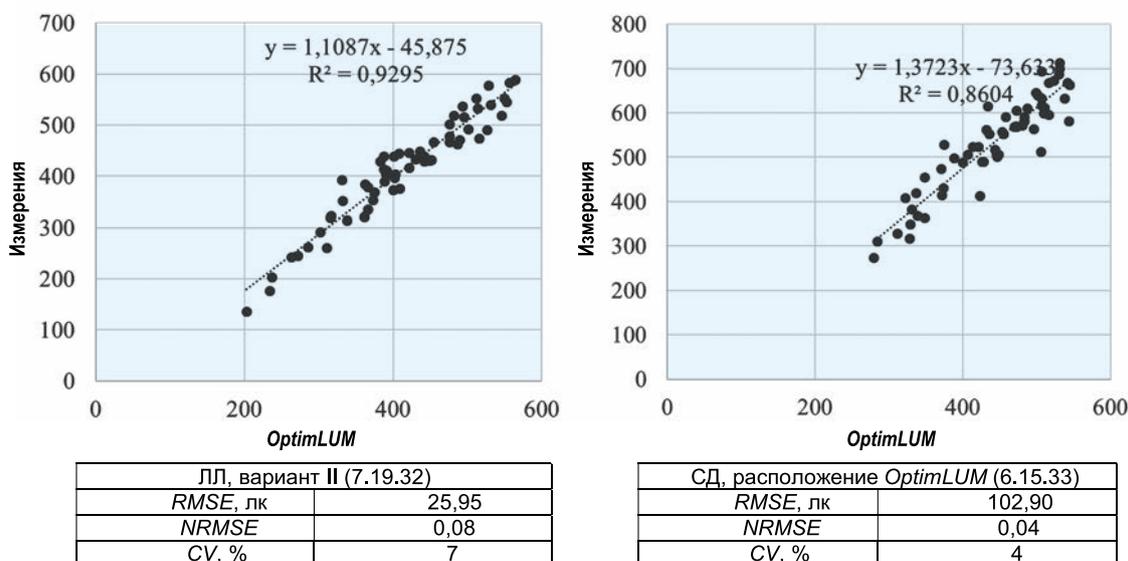


Рис. 8. Статистический анализ варианта II расположения светильников с ЛЛ и расположения *OptimLUM* светильников с СД

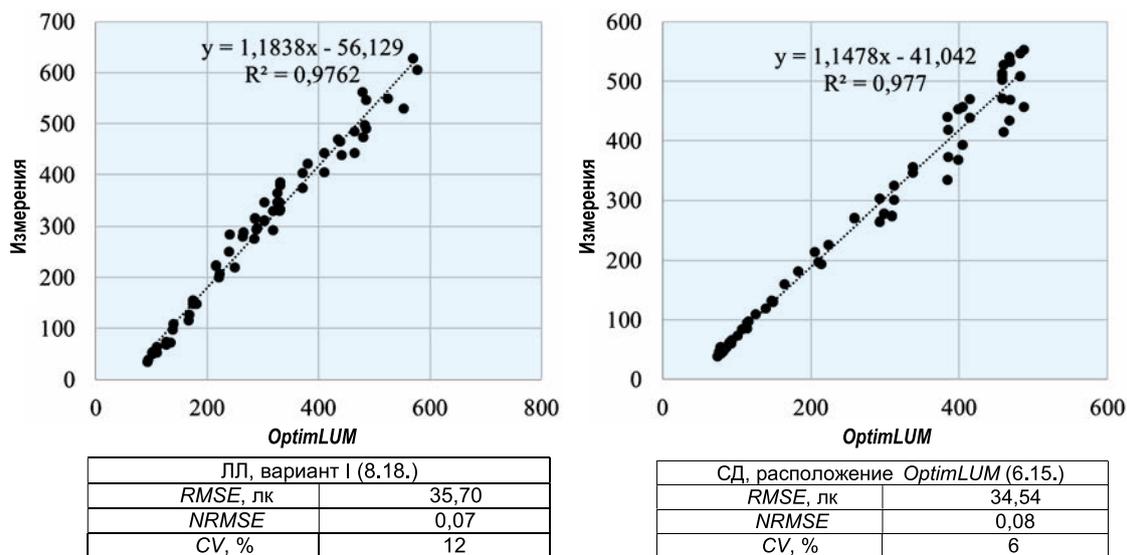


Рис. 9. Статистический анализ варианта I расположения двух светильников с ЛЛ и расположения OptimLUM двух светильников с СД

Коэффициент вариации среднеквадратического отклонения CV является ещё одним статистическим показателем, позволяющим оценить правильность модели оптимизации. Этот показатель рассчитывают по формуле

$$CV = \frac{RMSE}{\bar{m}} \cdot 100, \quad (10)$$

где \bar{m} – выборочное среднее из результатов измерения освещённости. Чем ближе CV к 0 %, тем значения освещённости, рассчитанные в программе OptimLUM, ближе к измеренным значениям освещённости. Тот факт, что для всех сценариев CV лежит в интервале от 4 до 12 %, свидетельствует о надёжности предложенной модели (рис. 6–8).

4.2. Проверка правильности процесса оптимизации

Модель была сформирована в целях оптимизации равномерного освещения с учётом содержащихся в стандартах требований к средней освещённости [16]. Сравнение альтернативных вариантов расположения светильников и расположения, полученного при помощи программы OptimLUM, показало, что последнее обеспечивает близкие к нормируемым значения средней освещённости (300–500 лк), тогда как в случае варианта I расположения светильников с СД это оказалось не так. Что же касается равномерности, то в случае полученного при помощи программы OptimLUM расположения светильников она также оказа-

лась более хорошей для светильников обоих типов: $MRD = 0,13$, а величина E_{min}/E_{avg} оказалась равной 0,63, что выше, чем в других вариантах, и близко к равному 0,8 опорному значению равномерности [16] (табл. 2).

5. Заключение

В статье описаны процессы разработки и подтверждения правильности новой модели оптимизации, получившей название OptimLUM и предназначенной для определения оптимального энергоэффективного расположения светильников, обеспечивающего выполнение требований к зрительному комфорту. Обеспечение энергоэффективности основано на использовании минимального количества располо-

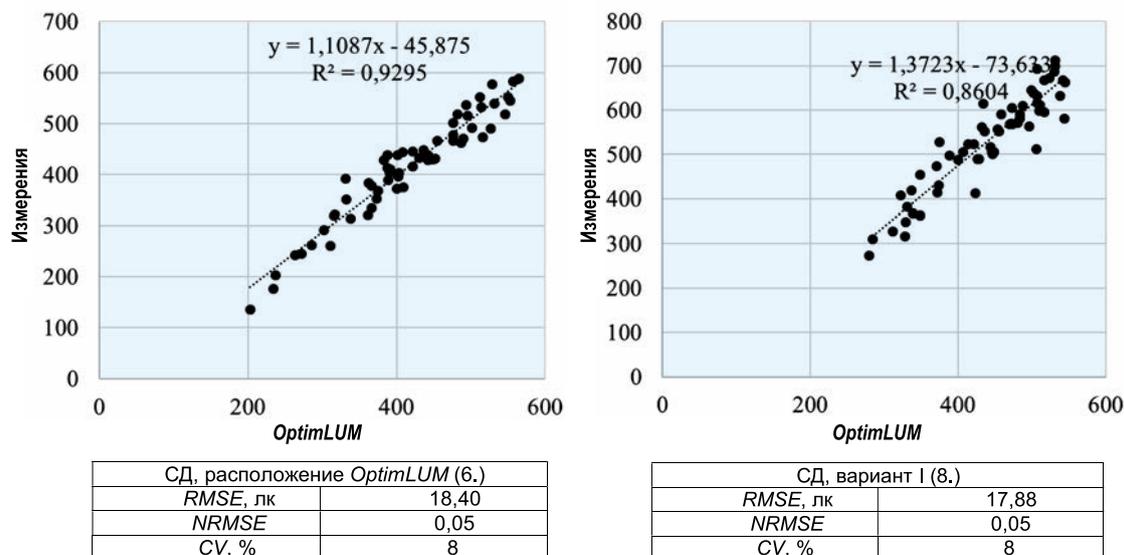


Рис. 10. Статистический анализ варианта I расположения одного светильника с СД и расположения OptimLUM одного светильника с СД

Таблица 2

Результаты расчётов E_{avg} и двух показателей равномерности, проведённых для расположения, полученного при помощи *OptimLUM*, и вариантов I и II применительно к светильникам с СД и ЛЛ

		<i>OptimLUM</i>	Вариант I	Вариант II
Светильники с СД	E_{avg} , лк	441,72	518,09	491,21
	$U (MRD)$	0,13	0,21	0,17
	$U (E_{min}/ E_{avg})$	0,63	0,57	0,45
Светильники с ЛЛ	E_{avg} , лк	327,83	407,24	387,89
	$U (MRD)$	0,13	0,21	0,17
	$U (E_{min}/ E_{avg})$	0,52	0,58	0,49

женных наилучшим образом светильников, а не светильников, расположенных в узлах сетки или симметрично, как это принято в программе *DIALux*. Предложенный инструмент отражает новый альтернативный подход к использованию моделей оптимизации в области архитектурного освещения. Полученная быстродействующая, эффективная и динамическая модель может оказаться полезной на ранних стадиях проектирования.

Достоверность новой модели была проверена посредством сравнения измеренных в реальных условиях значений освещённости с её расчётными значениями. При этом были рассмотрены два типа светильников – с СД и с ЛЛ. Помимо расположений этих светильников, которые были определены при помощи программы *OptimLUM*, были рассмотрены и другие варианты расположения светильников, в том числе одного или двух. Анализ распределений освещённости, полученных для всех вариантов, показал, что результаты расчётов в программе *OptimLUM* согласуются с экспериментальными данными лучше, чем результаты расчётов в программе *DIALux*. Результаты моделирования с большой точностью совпадают с результатами измерений. Подтверждённая правильность модели *OptimLUM* позволяет утверждать, что эта модель окажется полезной для архитекторов и проектировщиков освещения при определении правильного расположения светильников, позволяющего избежать неравномерного распределения освещённости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shikder, S. H., Mourshed, M. M., Price, A. D.F.* Luminaire position optimisation using radiance based simulation: a test case of a senior

living room // Proc. of the Int. Conf. on Computing in Civil and Building Engineering, 2010.

2. *Erkin, E., Onaygil, S.* An approach for calculating lighting energy saving potentials in the office buildings on the basis of LENO data // Light and Engineering.– 2014. – Vol. 22, No. 3. – P. 37–46.

3. *Онайгил С., Эркин Э.* Новый подход к расчёту экономии энергии для освещения офисных зданий // Светотехника.– 2015.– № 2. – С. 30–38.

4. *Mourshed, M., Shikder, S., Price, A. D.F.* Phi-array: A novel method for fitness visualization and decision making in evolutionary design optimization // Advanced Engineering Informatics.– 2011. – Vol. 25, No. 4. – P. 676–687.

5. *Zheltoy, V.S., Budak, V.P.* Mathematical simulation of lighting installations using a computer // Light and Engineering.– 2017. – Vol. 25, No. 2. – P. 113–120.

6. *Будак В.П., Желтов В.С.* Современное состояние и перспективы развития компьютерных методов моделирования осветительных установок // Светотехника.– 2017.– № 1. – С. 18–23.

7. *Cassol, F., Schneider, P. S., França, F. H. R., Silva Neto, A.J.* Multi-objective optimization as a new approach to illumination design of interior spaces // Building and Environment.– 2011. – Vol. 46, No. 2. – P. 331–338.

8. *Liu, J., Zhang, W., Chu, X., Liu, Y.* Fuzzy logic controller for energy savings in a smart LED lighting system considering lighting comfort and daylight // Energy and Buildings.– 2016. – Vol. 127. – P. 95–104.

9. *De Rosa, A., Ferraro, V., Igawa, N., Kalliakatos, D., Marinelli, V.* INLUX: A calculation code for daylight illuminance predictions inside buildings and its experimental validation // Building and Environment.– 2009. – Vol. 44, No. 8. – P. 1769–1775.

10. *Rocha, H., Peretta, I. S., Lima, G. F. M., Marques, L. G., Yamanaka, K.* Exterior lighting computer-automated design based on multi-criteria parallel evolutionary algorithm: Optimized designs for illumination quality and energy efficiency // Expert Systems with Applications.– 2016. – Vol. 45, No. 3. – P. 208–222.

11. IESNA (Illuminating Engineering Society of North America IESNA), Lighting handbook reference & application., 2000.

12. *Congradac, V., Milosavljevic, B., Velickovic, J., Prebiracevic, B.* Control of the lighting system using a genetic algorithm // Thermal Science.– 2012. – Vol. 16, No. 1. – P. 237–250.

13. CIBSE (Chartered Institution of Building Services Engineers). Code for lighting. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.

14. *Ferentinos, K. P., Albright, L.D.* Optimal design of plant lighting system by genetic algorithms // Engineering Applications of Artificial Intelligence.– 2005. – Vol. 18, No. 4. – P. 473–484.

15. Palisade Corporation, Evolver. 2013.

16. CIBSE (Chartered Institution of Building Services Engineers), Office Lighting Guide LG7, Society of Light and Lighting, London, 2005.

17. *Fontoynton, M., Berrutto, V.* Daylighting performance of buildings: monitoring procedure // Right Light.– 1997. – Vol. 2, No. 4. – P. 119–127.



Илкнур Ерлалитепе Уйгун (Ilknur Erlalitepe Uygun), М. Sc.

(2012 г.). Аспирант (Ph.D.) и ассистент кафедры архитектуры Измирского технического ин-

ститута. Область научных интересов: энергоэффективность, архитектурная подсветка и оптимизация



Тугче Казанмаз (Tuğçe Kazanmaz), Ph.D.,

профессор. Профессор кафедры архитектуры Измирского технического института. Имеет 18-летний опыт преподавательской

работы в области архитектурной подсветки, физики зданий и энергоэффективного проектирования



Сердар Кале (Serdar Kale),

Ph.D., профессор. Окончил Университет Хериота-Уатта, Эдинбург, Шотландия (1994 г.). Профессор кафедры архитектуры Измирского технического

института. Область научных интересов: управление строительством, научно-техническим развитием и инновациями и оценка эффективности