

КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЫТОВЫХ СВЕТОДИОДНЫХ ЛАМП

В работе рассматривается вопрос динамики передачи тепла в бытовой светодиодной лампе и сценарии упрощения моделирования теплового распределения, включающие учет теплопроводности, конвекцию и влияние нескольких светодиодных источников света. Представлен комплексный анализ процессов распределения тепла в бытовых светодиодных лампах и разработка математической модели теплового излучения светодиодного источника света с использованием метода конечных разностей. Разработанная модель учитывает геометрию лампы, свойства материалов и условия окружающей среды. Особое внимание уделяется влиянию расположения светодиодов в системе лампы. Анализ процессов распределения тепла сопровождается формулированием математической модели теплового излучения, исходящего от светодиодного источника света, с использованием метода конечных разностей. Новизна исследования заключается в том, что в математическую модель включены объемная геометрия лампы и источника света, сценарии учета различных параметров модели. Верификация модели показала точность до 93 %. Исследование направлено на создание более реалистичного и точного метода моделирования и анализа теплового управления в многосветодиодных осветительных приборах бытового назначения.

Ключевые слова: моделирование теплового излучения, тепловая модель светодиодной лампы, качество светодиодных осветительных приборов, тепловой менеджмент светодиодных ламп.

Растущая популярность светодиодных осветительных приборов, в силу гибкости их управления и значительной энергетической эффективности в различных областях применения, включая бытовое освещение, использование в технологиях проектирования дисплеев и промышленное использование, вызывает рост требований к качеству и эффективности данных источников света. Эффективное управление тепловым распределением в данных изделиях имеет решающее значение для светодиодных осветительных приборов (СОП), поскольку оно напрямую влияет на качество и световую эффективность светодиодов [1].

Исследования распределения тепла в СОП все чаще проводятся с помощью численного моделирования, которое предлагает экономичный и эффективный способ анализа и оптимизации процесса теплового менеджмента в системе осветительного прибора. Методы конечных разностей (МКР) стали особенно популярным инструментом благодаря своей точности и универсальности. Широкий спектр исследований использования МКР для численного анализа распределения тепла в электрических приборах, в том числе осветительных устройствах, показывает актуальность и эффективность приме-

нения данных методов для решения моделей теплового распределения. Однако для СОП все еще существует необходимость оптимизации моделей теплового распределения и разработки различных сценариев построения и решения данных моделей [2, 3].

Существуют исследования, представляющие 2D-модели на основе МКР для изучения распределения тепла в одиночных светодиодных системах [4]. Они показывают исследование и анализ влияния различных коэффициентов проводимости и конвекции на тепловые характеристики светодиодов, аналогичным образом развитие данных моделей получило в разработке и построении данного подхода на 3D-модели, чтобы лучше описать пространственное распределение тепла внутри СОП [5]. Эти исследования, хотя и носят всеобъемлющий характер, в основном сосредоточены на сценариях с одним светодиодом.

Представленная работа направлена на расширение существующего объема исследований путем моделирования и симуляции теплового излучения СОП в сценариях с несколькими светодиодами для более точного приближения к реальной светодиодной системе. В качестве объекта моделиро-

вания была выбрана бытовая светодиодная лампа типа E27, так как данное устройство подвержено значительному температурному воздействию и нуждается в дополнительных инструментах теплового моделирования для осуществления теплового менеджмента. Для решения разработанной модели и анализа распределения тепла в описанном СОП использовались инструменты MATLAB.

1. Разработка модели теплового излучения светодиода в системе бытовой светодиодной лампы. Эффективным методом теплового моделирования является оптическое моделирование распространения радиационного тепла с учетом теплового моделирования теплопередачи и геометрического анализа. Оптическая модель использует концепцию коэффициентов отражения для описания обмена излучаемым теплом между светодиодным источником света и внутренними поверхностями лампы. Поэтому для построения модели будем использовать концепцию коэффициентов отражения.

На основании приведенного во введении анализа существующих тепловых моделей рассмотрим и выделим основные характеристики, которые должна учитывать разрабатываемая модель, чтобы улучшать существующие решения [6, 7].

Во-первых, необходимо учитывать, насколько эффективно светодиодная лампа излучает тепло по сравнению с идеальным излучателем черного цвета, этого можно добиться через ввод в модель коэффициента излучения $\varepsilon(T)$. Это позволяет модели учитывать изменения эффективности теплового излучения лампы при изменении температуры [8].

В типовых моделях уравнение адвекции-диффузии обычно предполагает, что удельная теплоемкость C_p , плотность ρ и теплопроводность k являются постоянными. Это предположение может привести к неточностям в модели, особенно при более высоких температурах, когда эти свойства могут значительно изменяться [9, 10]. Поэтому в разрабатываемой модели необходимо данные параметры рассматривать как зависящие от температуры, то есть они должны быть представлены в виде $C_p(T)$, $\rho(T)$ и $k(T)$. Это дополнение позволяет сделать модель более точной в различных условиях эксплуатации. Аналогичным образом коэффициент конвективной теплопередачи h , который в типовых моделях принимается постоянной величиной, обычно является функцией температуры, поэтому целесообразно введение зависящих от температуры граничных условий в виде $h(T)$.

Также типовые модели, как правило, не учитывают снижение эффективности светодиодов с повышением температуры. Этот эффект может привести к тому, что большая часть электрической энергии преобразуется в тепло, увеличивая тепловую нагрузку на лампу [6]. Разрабатываемая модель будет учитывать этот эффект за счет введения зависящей от температуры функции максимальной мощности $P_{\max}(T)$.

Для построения модели необходимо ввести обозначения конкретного рассматриваемого теплового элемента подложки в многомерном массиве, для этого введем индексы i, j, k и l .

Индексы i и j используются для обозначения конкретной светодиодной матрицы. В системе с несколькими светодиодами каждый отдельный светодиод будет идентифицироваться как уникальная пара координат (i, j) .

Аналогично индексы k и l используются для обозначения конкретного рассматриваемого элемента

подложки. В системе с несколькими элементами подложки каждый отдельный элемент будет идентифицирован уникальной парой координат (k, l) .

По сути, индексы (i, j, k, l) позволяют конкретно привязать каждый отдельный светодиод и элемент подложки в системе, что позволит детально рассчитать теплопередачу излучения между ними.

Это становится особенно важным при работе со сложными системами, включающими множество светодиодов и элементов подложки, где теплопередача излучения может значительно варьироваться между различными элементами.

Данный подход позволяет вычислить входную энергию излучения $dQ_{i,j,k,l}$ для площади поверхности, учитывая зависящую от температуры излучательную способность $\varepsilon(T)$, интенсивность источника $u_{i,j}$, максимальную мощность P_{\max} и коэффициенты обзора:

$$dQ_{i,j,k,l} = \varepsilon(T)u_{i,j}P_{\max}F_{1 \rightarrow 2}dA_{k,l}.$$

Включение данного уравнения в модель для всех соответствующих пар элементов светодиод-подложка позволит более точно рассчитать входную энергию излучения, учитывая свойства, зависящие от температуры, и геометрические факторы.

Так как светодиоды преобразуют электрическую энергию в свет и тепло и доля электрической энергии, преобразуемой в тепло, зависит от эффективности светодиода, которая имеет тенденцию снижаться с повышением температуры, то уравнение входной энергии излучения представлено в модели с зависящей от температуры функцией максимальной мощности $P_{\max}(T)$.

Модель должна учитывать дифференциальную энергию излучения $dQ_{i,j,k,l}$ для каждой отдельной пары светодиод-подложка, а затем суммарный тепловой поток и поглощенная освещенность получаются путем суммирования этих вкладов для всех соответствующих пар.

Тогда суммарный тепловой поток $q_{k,l}$ и поглощенную освещенность $E_{k,l}$ на каждой поверхности можно рассчитать следующим образом:

$$E_{k,l} = q_{k,l} = \sum_i \sum_j \varepsilon(T)u_{i,j}P_{\max}F_{1 \rightarrow 2}dA_{k,l}.$$

Данное уравнение представляет собой суммарную поглощенную освещенность или тепловой поток на каждом элементе поверхности (k, l) с учетом всех соответствующих пар светодиод-подложки (i, j) .

Следует отметить, что при численном расчете необходимо перебрать все комбинации (i, j) и рассчитать вклад каждого светодиода в тепловой поток и поглощенную освещенность на соответствующем элементе подложки (k, l) . Сумма по i и j в уравнении отражает это суммирование для всех светодиодов.

Тепловое моделирование описывает распространение тепла через лампу.

Принимая уравнение адвекции-диффузии, которое учитывает зависящие от температуры свойства материала, такие как удельная теплоемкость $C_p(T)$, плотность $\rho(T)$ и теплопроводность $k(T)$, получаем:

$$\begin{aligned} C_p(T)\rho(T)v_x \frac{\partial T}{\partial t} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right), \end{aligned}$$

где $C_p(T)$ — удельная теплоемкость, зависящая от температуры;

$\rho(T)$ — плотность, зависящая от температуры;

v_x — скорость в направлении x (при учете конвективных эффектов);

T — температура;

x, y, z — пространственные размеры;

$k_x(T), k_y(T), k_z(T)$ — зависящие от температуры теплопроводности в направлениях x, y и z соответственно.

Уравнение уравнивает накопление тепла за счет конвекции (левая часть) с его пространственной диффузией (правая часть).

Конвективный теплообмен на внешней и излучаемой поверхности лампы регулируется двумя уравнениями. Для внешней границы лампы уравнение представляет конвективный теплообмен на внешней границе лампы. Левая часть представляет собой теплопроводность из лампы, а правая часть — теплопередачу за счет конвекции:

$$-k(T)\frac{\partial T}{\partial n} = h(T)(T - T_{\text{окр}}),$$

аналогично для теплообмена на излучаемой поверхности:

$$-k(T)\frac{\partial T}{\partial n} = E + h(T)(T - T_{\text{окр}}),$$

где E — представляет собой радиационный теплообмен;

$k(T)$ — теплопроводность в зависимости от температуры;

$\frac{\partial T}{\partial n}$ — градиент температуры по нормали к поверхности, где n обозначает направление, нормальное к граничной поверхности;

$h(T)$ — коэффициент конвективного теплообмена;

$T_{\text{окр}}$ — температура окружающей среды.

Далее необходимо учесть уравнение радиационного теплообмена:

$$-\nabla \cdot q = \varepsilon \sigma (T^4 - T_{\text{окр}}^4),$$

уравнение трехмерной теплопроводности:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T),$$

Объединяя уравнения, получаем:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \nabla \cdot q_{\text{рад}},$$

где $q_{\text{рад}}$ — вектор радиационного теплового потока, который является функцией уравнения радиационного теплообмена.

Дополнительно можно ввести в модель число Пекле — безразмерный параметр, который дает представление о доминирующем механизме теплопередачи.

Если число Пекле определяется как:

$$Pe = \frac{l v}{a},$$

l — характерная длина (часто характерный размер системы);

v — характеристическая скорость жидкости (или материала);

a — теплопроводность материала, задаваемая формулой:

$$a = \frac{k}{\rho C_p},$$

где k — теплопроводность материала,

ρ — плотность материала,

C_p — удельная теплоемкость материала.

По сути, число Пекле сравнивает скорость тепловой конвекции (за счет движения жидкости) со скоростью теплопроводности (за счет градиента температуры). Низкое число Пекле указывает на преобладание теплопроводности, а высокое число Пекле — на преобладание конвекции.

В контексте тепловой модели светодиодной лампы введение числа Пекле может дать представление о том, насколько важны кондукция и конвекция в процессе теплопередачи. Оно поможет понять, оказывает ли движение воздуха (или любой другой среды) вокруг лампы существенное влияние на общий теплообмен по сравнению с кондуктивным теплообменом внутри материалов лампы.

Рассчитав и проанализировав число Пекле для различных условий эксплуатации, можно получить лучшее представление об относительной важности кондукции и конвекции в системе. Эта информация может послужить руководством при выборе конструкции и помочь оптимизировать тепловые характеристики лампы.

Тогда полная система уравнений модели будет выглядеть следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_p(T)\rho(T)v_x \frac{\partial T}{\partial t} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ - \nabla \cdot q = \varepsilon \sigma (T^4 - T_{\text{окр}}^4) \\ - k(T) \frac{\partial T}{\partial n} = h(T)(T - T_{\text{окр}}) \\ - k(T) \frac{\partial T}{\partial n} = E + h(T)(T - T_{\text{окр}}) \\ Pe = \frac{l v}{a} \end{array} \right.,$$

где переменные $T(x, y, z, t)$ и $q_{\text{рад}}(x, y, z, t)$ представляют собой распределение температуры в трехмерном пространстве и времени и вектор радиационного потока тепла соответственно;

ρ — плотность материала;

$C_p(T)$ — удельная теплоемкость в зависимости от температуры;

v_x — компонента скорости в направлении x (при учете конвективных эффектов);

$k_x(T), k_y(T), k_z(T)$ — зависимость теплопроводности от температуры в направлениях x, y и z соответственно;

ε — излучательная способность поверхности;

σ — постоянная Стефана — Больцмана;

$T_{\text{окр}}$ — температура окружающей среды;

$T_{\text{окр},p}$ — температура окружающей среды в радиационной поверхности.

Взаимосвязь между описанными выражениями заключается в том, что они оба вносят вклад в общий теплообмен в системе. Уравнение тепло-

проводности описывает теплопроводность внутри материала, а уравнение радиационной теплопередачи — радиационный обмен теплом на поверхности. В общей модели необходимо решить оба уравнения одновременно, учитывая их соответствующие условия и граничные условия [10, 11].

2. Численное моделирование представленной модели. При численном решении представленной модели рассматривались два случая. В первом случае в модели в качестве источника тепла существует только один светодиод типа SMD2835 с размерами 3,5×2,8 мм и имеет параметры теплоемкости в 900 Дж/(кг·К), плотности 3000 кг/м³ теплопроводность 1 Вт/(м·К).

Во втором случае была рассмотрена модель с уже шестью светодиодами с аналогичными характеристиками, но расположенными в пределах границы бытовой светодиодной лампы типа «груша» с патроном E27 и диаметром 50 мм, граничные условия задавались так, чтобы модель сочетала в себе перечисленные аспекты тепловых характеристик светодиодной лампы типа E27.

При численном моделировании использовался метод конечных разностей для решения уравнения теплопроводности в переходный период на двумерной сетке, представляющей корпус светодиодной лампы. Геометрия корпуса светодиода, характеризующаяся размерами L_x и L_y , встраивалась в сетку модели:

$$\begin{cases} dx = \frac{L_x}{(n-1)} \\ dy = \frac{L_y}{(n-1)} \end{cases},$$

где n — количество точек сетки.

Начальная температура задавалась равной 25 °С, а для продвижения моделирования используется дискретный шаг по времени ($dt = 0,1$ с). Для дискретизации корпуса лампы используется сеточный подход со 100 точками сетки по каждому измерению.

При использовании метода конечных разностей распределение температуры в каждой точке сетки обновляется с учетом соседних точек и вклада источника тепла.

Результаты моделирования для одного светодиода в двумерном пространстве, ограниченном только сеткой модели, представлены на рис. 1.

Результаты моделирования для случая с шестью светодиодами, расположенными равноудаленно друг от друга и от центра лампы типа E27 диаметром 50 мм, представлены на рис. 2.

3. Результаты и обсуждение. Результаты моделирования дают полное представление о распределении температуры внутри светодиодных ламп, содержащих несколько SMD-светодиодов. Примечательно, что предсказания модели продемонстрировали отчетливые различия в температурных режимах, основанные на количестве светодиодов, присутствующих в конфигурации. В частности, модель дала результаты для сценария с шестью светодиодами SMD, показав максимальную температуру распределения приблизительно 97 °С. В отличие от этого, модель прогнозировала максимальную температуру в приблизительно 75 °С для корпуса с одним светодиодом.

Наблюдаемая разница в распределении температуры между сценариями с одним светодиодом

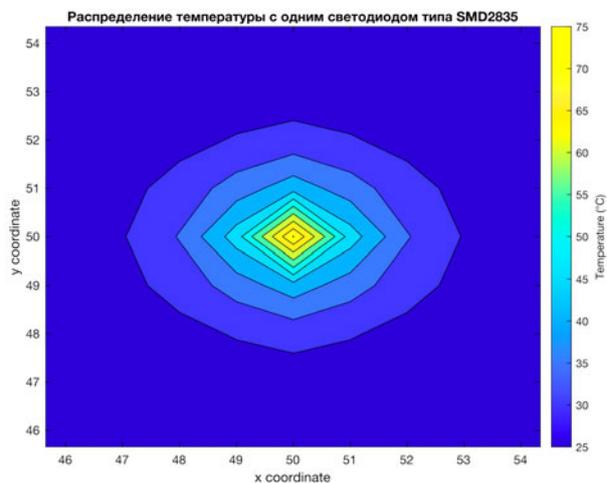


Рис. 1. Распределение температуры при численном решении разработанной модели в двумерном пространстве для одного светодиода

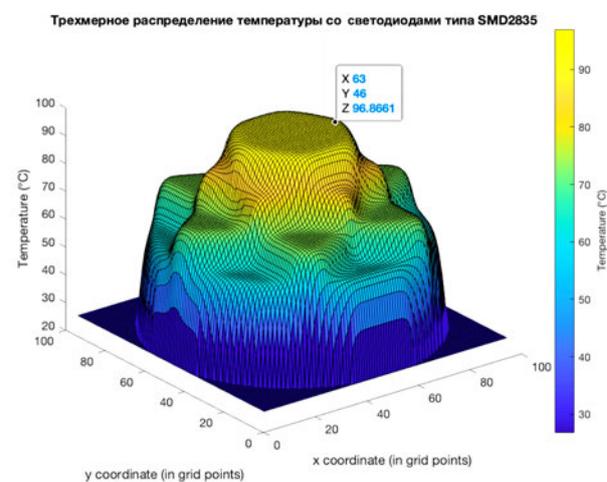


Рис. 2. Распределение температуры при численном решении разработанной модели в трехмерном пространстве для шести светодиодов

и сценариями с шестью светодиодами может быть объяснена несколькими взаимосвязанными факторами.

Совокупное тепло, выделяемое несколькими светодиодами, способствует повышению температуры. Пространственное расположение светодиодов влияет на рассеивание тепла, что приводит к локальным колебаниям температуры. Плотные расположенные светодиоды в системе лампы препятствуют эффективному отводу тепла, что приводит к более высоким температурам по сравнению со сценарием с одним светодиодом.

Также плотность тепловыделения вблизи светодиодов значительно выше в конфигурации с несколькими светодиодами. Эта концентрированная тепловая нагрузка усиливает температурные градиенты, приводя к более выраженным колебаниям температуры по всему корпусу светодиода. Таким образом модель учитывает взаимодействия между соседними светодиодами, которые влияют на общее распределение температуры. Теплопередача между светодиодами в сочетании с ограниченными путями отвода тепла приводит к распространению повышенных температур по всему корпусу. Каждый

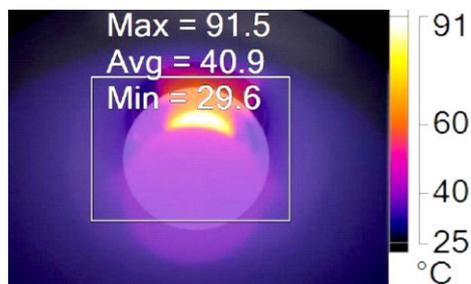


Рис. 3. Инструментальное измерение температурного распределения в бытовой светодиодной лампе мощностью 6,5 Вт с шестью светодиодами

светодиод создает вокруг себя локализованную горячую точку за счет своего тепловыделения. В системе с шестью светодиодами близость нескольких горячих точек усиливает их совокупное влияние на распределение температуры.

Численное решение разработанной модели показывает точность на уровне 93 %. Сравнение предсказаний модели с термограммой, полученной с помощью тепловизора Fluke tis 20 (рис. 3), подчеркивает обоснованность используемого вычислительного подхода [12].

Для конкретных случаев, требующих простого, но надежного подхода, предлагаемая модель предоставляет доступную альтернативу. Сложные схемы расположения светодиодов и граничных условий иногда могут быть сложными для настройки с помощью сложных вычислительных инструментов. В таких случаях простота модели в обращении с базовыми конфигурациями ускоряет процесс настройки моделирования, позволяя пользователям быстро определять параметры и инициировать моделирование.

Применение разработанной температурной модели для стандартизации и управления качеством продукции предполагает использование возможностей модели для обеспечения соответствия светодиодных ламп определенным температурным стандартам и критериям качества. Модель может быть использована для проверки соответствия вновь разработанной светодиодной лампы заданным температурным ограничениям в процессе эксплуатации. При вводе конструктивных параметров лампы, свойств материала и мощностных характеристик модель позволяет предсказать распределение температуры по лампе. Эта информация может быть сравнена с установленными стандартами для обеспечения соответствия.

В процессе производства модель может помочь в контроле качества путем моделирования распределения температуры для случайно выбранных образцов светодиодных ламп.

Это позволяет выявить лампы, существенно отклоняющиеся от ожидаемых температурных режимов. Лампы, превышающие допустимые температурные пороги, могут быть отмечены для дальнейшей проверки или настройки.

По сути, комплексная температурная модель служит виртуальным инструментом для оценки, оптимизации и обеспечения качества температурных характеристик светодиодных ламп. Интегрируя модель в различные этапы проектирования, производства и контроля качества, можно дополнительно контролировать тепловые общие эксплуатационные характеристики бытовых светодиодных ламп.

Заключение. Соответствие между выходными данными модели и эмпирическими данными подтверждает надежность и точность свойств модели и параметров моделирования. В контексте стандартизации и управления качеством продукции в светотехнической промышленности разработанная модель предлагает надежный инструмент для оценки тепловых характеристик бытовых светодиодных ламп при различных конфигурациях и условиях эксплуатации. Точность прогнозирования распределения температуры влияет на принятие обоснованных проектных решений для обеспечения соответствия своей продукции стандартам безопасности и эксплуатационных характеристик.

Разработанная модель дает важную информацию о сложных закономерностях распределения температуры внутри светодиодных ламп, содержащих несколько SMD-светодиодов. Отчетливые колебания температуры, наблюдаемые между различными конфигурациями светодиодов, подчеркивают важность тщательного теплового моделирования при проектировании светодиодов. В качестве исследовательского инструмента эта модель предлагает производителям путь к повышению качества продукции, оптимизации стратегий терморегулирования и вносит свой вклад в развитие энергоэффективных технологий освещения.

Интеграция данной модели в процессы управления качеством позволяет проверять светодиодную продукцию на соответствие определенным температурным показателям. Это облегчает выявление потенциальных горячих точек, зон чрезмерного нагрева и зон, подверженных риску выхода из строя из-за повышенных температур. Кроме того, этот вычислительный инструмент позволяет производить анализ оптимизации конструктивных параметров, таких как размещение светодиодов и конструкции теплоотвода, для повышения тепловой эффективности.

Поскольку индустрия освещения продвигается к повышению энергоэффективности и устойчивым практикам, разработанная вычислительная модель дает стратегическое преимущество при проектировании светодиодных изделий, которые работают оптимально, отвечают строгим требованиям к качеству и имеют увеличенный срок службы. Кроме того, универсальность модели в адаптации к различным конфигурациям светодиодов и условиям окружающей среды повышает ее применимость в широком спектре контекстов проектирования освещения.

Библиографический список

1. Cai M., Liang Z., Kunmiao T. [et al.]. Junction Temperature Prediction for LED Luminaires Based on a Subsystem-Separated Thermal Modeling Method // IEEE Access. 2019. P. 1–1. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2936924.
2. Wang C., Zhang Ch., Chen Q. [et al.]. Heat management of LED-based Cu₂O deposits on the optimal structure of heat sink // High Temperature Materials and Processes. 2023. Vol. 42, no. 1. P. 20220277. DOI: 10.1515/htmp-2022-0277.
3. Huang Yi., Shen Sh., Li H. [et al.]. Numerical analysis on the thermal performances of different types of fin heat sink for high-power led lamp cooling // Thermal Science. 2019. Vol. 23. P. 625–636. DOI: 10.2298/TSCI170623233H.
4. Şahin N., Çiçek B. A. Numerical Analysis of Thermal Management for High Power LED Street Lights // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2018. Vol. 2. P. 1–12. DOI: 10.15623/ijret.2018.0702007.

5. Kuzmenko V. P., Solonyy S. V., Rysin A. V. Qualimetric Model of Heat Sinks of LED Lightning Devices Based on their Thermal Models // 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). 2022. P. 1695–1697. DOI: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755619.
6. Orth T., Krahl M., Parlevliet P. P. [et al.]. Optical thermal model for LED heating in thermoset-automated fiber placement // Advanced Manufacturing Polymer & Composites Science. 2018. Vol. 4. P. 72–81. DOI: 10.1080/20550340.2018.1507798.
7. Бозриков А. В., Алексеев В. С., Ангонов И. Н. Современные проблемы производства энергоэффективных систем освещения // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. Т. 1, № 3 (54). С. 80–84. EDN: PVMFZV.
8. Шириев Р. Р., Борисов А. Н., Валеев А. А. Об обеспечении теплового режима светодиодного источника света // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т. 24, № 3. С. 112–120. DOI: 10.30724/1998-9903-2022-24-3-112-120. EDN: ZIJECR.
9. Кушнарев А. С., Макаров О. Ю. Методика обеспечения тепловых режимов радиоэлектронных устройств с мощными светодиодами // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15, № 3. С. 90–95. DOI: 10.25987/VSTU.2019.15.3.013. EDN: FGSIE.
10. Aladov A. V., Bulashevich K. A., Chernyakov A. E. [et al.]. Thermal resistance and nonuniform distribution of electroluminescence and temperature in high-power AlGaInN light-emitting diodes // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 2015. № 2 (218). P. 74–83. DOI: 10.5862/JPM.218.7. EDN: TZGPAJ.
11. Аладов А. В., Белов И. В., Валюхов В. П. [и др.]. Исследование теплового режима в мощных светодиодных матрицах // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. 2018. Т. 11, № 3. С. 39–51. DOI: 10.18721/JPM.11304. EDN: YBRQVN.
12. Кузьменко В. П., Шишлаков В. Ф., Соленный С. В. [и др.]. Исследовательские испытания светодиодных источников света // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 7. С. 632–640. DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-7-632-640. EDN: PLVUMB.

КУЗЬМЕНКО Владимир Павлович, кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники (№ 32) Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург.
SPIN-код: 3159-4202
AuthorID (РИНЦ): 1111872
ORCID: 0000-0002-0270-4875
AuthorID (SCOPUS): 57215003337
Адрес для переписки: mr.konnny@gmail.com

Для цитирования

Кузьменко В. П. Комплексная модель распределения температуры для контроля тепловых характеристик бытовых светодиодных ламп // Омский научный вестник. 2024. № 1 (189). С. 48–55. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-48-55.

Статья поступила в редакцию 19.08.2023 г.
© В. П. Кузьменко

COMPLEX TEMPERATURE DISTRIBUTION MODEL FOR CONTROLLING THE THERMAL PERFORMANCE OF HOUSEHOLD LED LAMPS

The study covers the question of the dynamics of heat transfer in a household LED lamp and scenarios for simplifying the modeling of thermal distribution, including the account of heat conduction, convection and the influence of several LED light sources. A comprehensive analysis of heat distribution processes in household LED lamps and the development of a mathematical model of the thermal radiation of an LED light source using the finite difference method are presented. The developed model takes into account the lamp geometry, material properties and environmental conditions. Special attention is paid to the influence of the location of the LEDs in the lamp system. The novelty of the study lies in the fact that the volumetric geometry of the lamp and light source, scenarios to account for various parameters of the model are included in the mathematical model. Verification of the model has shown accuracy up to 93 %. The study aims to create a more realistic and accurate method for modeling and analyzing thermal management in multilight LED household lighting fixtures.

Keywords: thermal radiation modeling, LED lamp thermal model, LED lighting fixture quality, LED lamp thermal management.

References

1. Cai M., Liang Z., Kunmiao T. [et al.]. Junction Temperature Prediction for LED Luminaires Based on a Subsystem-Separated Thermal Modeling Method // IEEE Access. 2019. P. 1–1. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2936924. (In Engl.).
2. Wang C., Zhang Ch., Chen Q. [et al.]. Heat management of LED-based Cu₂O deposits on the optimal structure of heat sink // High Temperature Materials and Processes. 2023. Vol. 42, no. 1. P. 20220277. DOI: 10.1515/htmp-2022-0277. (In Engl.).
3. Huang Yi., Shen Sh., Li H. [et al.]. Numerical analysis on the thermal performances of different types of fin heat sink for high-power led lamp cooling // Thermal Science. 2019. Vol. 23. P. 625–636. DOI: 10.2298/TSC1170623233H. (In Engl.).
4. Şahin N., Çiçek B. A Numerical Analysis of Thermal Management for High Power LED Street Lights // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2018. Vol. 2. P. 1–12. DOI: 10.15623/ijret.2018.0702007. (In Engl.).
5. Kuzmenko V. P., Solony S. V., Rysin A. V. Qualimetric Model of Heat Sinks of LED Lightning Devices Based on their Thermal Models // 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). 2022. P. 1695–1697. DOI: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755619. (In Engl.).
6. Orth T., Krahl M., Parlevliet P. P. [et al.]. Optical thermal model for LED heating in thermoset-automated fiber placement // Advanced Manufacturing Polymer & Composites Science. 2018. Vol. 4. P. 72–81. DOI: 10.1080/20550340.2018.1507798. (In Engl.).
7. Bozrikov A. V., Alekseyev V. S., Antonov I. N. Sovremennyye problemy proizvodstva energoeffektivnykh sistem osveshcheniya [Modern problems of production energy efficient lighting systems] // Vestnik Saratovskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. *Vestnik of Saratov State Technical University*. 2011. Vol. 1, no. 3 (54). P. 80–84. EDN: PVMFZV. (In Russ.).
8. Shiriyev R. R., Borisov A. N., Valeyev A. A. Ob obespechenii teplovogo rezhima svetodiodnogo istochnika sveta [LED source of light with high light circuit] // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. *Problemy Energetiki. Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2022. Vol. 24, no. 3. P. 112–120. DOI: 10.30724/1998-9903-2022-24-3-112-120. EDN: ZIJECR. (In Russ.).
9. Kushnarev A. S., Makarov O. Yu. Metodika obespecheniya teplovykh rezhimov radioelektronnykh ustroystv s moshchnymi svetodiodami [Methodology of optimizing thermal regimes of radioelectronic devices with powerful LED] // Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2019. Vol. 15, no. 3. P. 90–95. DOI: 10.25987/VSTU.2019.15.3.013. EDN: FGSIII. (In Russ.).
10. Aladov A. V., Bulashevich K. A., Chernyakov A. E. [et al.] Thermal resistance and nonuniform distribution of electroluminescence and temperature in high-power AlGaInN light-emitting diodes // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. *Physics and Mathematics*. 2015. No. 2 (218). P. 74–83. DOI: 10.5862/JPM.218.7. EDN: TZGPAJ. (In Engl.).
11. Aladov A. V., Belov I. V., Valyukhov V. P. [et al.]. Issledovaniye teplovogo rezhima v moshchnykh svetodiodnykh matritsakh [A Study of Thermal Regime in the High-Power LED Arrays] // Nauchno-Tekhnicheskiye Vedomosti Sankt-Peterburgskogo Gosudarstvennogo Politeknicheskogo Universiteta. *Fiziko-Matematicheskiye Nauki. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. 2018. Vol. 11, no. 3. P. 39–51. DOI: 10.18721/JPM.11304. EDN: YBRQVN. (In Russ.).

12. Kuzmenko V. P., Shishlakov V. F., Solenyy S. V. [et al.]. Issledovatel'skiye ispytaniya svetodiodnykh istochnikov sveta [Research Tests of LED Light Sources] // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroyeniye. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, no. 7. P. 632–640. DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-7-632-640. EDN: PLVUMB. (In Russ.).

KUZMENKO Vladimir Pavlovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Electromechanics and Robotics (No. 32) Department, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg.
SPIN-code: 3159-4202

AuthorID (RSCI): 1111872
ORCID: 0000-0002-0270-4875
AuthorID (SCOPUS): 57215003337
Correspondence address: mr.konnny@gmail.com

For citations

Kuzmenko V. P. Complex temperature distribution model for controlling the thermal performance of household led lamps // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 1 (189). P. 48–55. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-48-55.

Received August 19, 2023.

© **V. P. Kuzmenko**