

# Расчёт теплового менеджмента уличных светильников со светодиодами

М. С. СЕНГИЗ, С. ЙЕТКИН

Университет Битлис Ерен, Битлис, Турция  
E-mail: msaitcengiz@gmail.com, syetkin@beu.edu.tr

## Аннотация

В этой работе было проведено имитационное исследование потери эффективности, вызванной теплом, выделяемым светодиодными чипами. Изменение температуры светодиодного светильника было проанализировано для трёх различных сценариев с использованием метода конечных элементов. Была предпринята попытка предотвратить выход светодиодов из строя из-за повышения температуры светильника путём нагнетания воздуха внутрь самого светодиодного светильника. Для этого в имитационной среде был предложен метод пассивного охлаждения. Соответственно, в мощных светодиодных светильниках высокий выход тепла, излучаемого светодиодными чипами, сводится к низким количествам с помощью воздушного потока. Таким образом, достигается эффективность на выходе светодиода.

**Ключевые слова:** светодиодное освещение, температура на светодиоде, тепловой анализ, энергоэффективность.

## 1. Введение

Светодиодная технология (на основе светоизлучающего диода), которая позволяет реализовывать эффективное освещение с меньшим потреблением энергии, предпочтительна из-за её особенностей, таких как высокая световая отдача (лм/Вт), хорошая цветопередача, различные варианты цвета и длительный срок службы. Кроме того, по мере развития полупроводниковых технологий эффективность светодиодов постоянно растёт. Однако, значения световой отдачи справедливы для экспериментальных исследований светодиодных чипов в лабораторных условиях. Известно, что изменение температуры влияет на световой поток и срок службы светодиодов гораздо сильнее, чем на традиционные источники света. При превышении оптимальных рабочих

температур скорость деградации светодиодов увеличивается, световой поток уменьшается, а цветовые характеристики становятся хуже. В результате этой ситуации высокая световая отдача (лм/Вт), заявленная производителями как основное преимущество светодиодных светильников, уменьшается из-за снижения эффективности светодиодов. Поэтому осветительные установки с использованием неэффективных светодиодных светильников встречаются во многих сферах применения [1–5].

По данным Объединения твердотельных осветительных систем и технологий (*Alliance for Solid-State Illumination Systems and Technologies, ASSIST-2005*) для измерения светодиодных чипов требуется в общей сложности 6000 часов работы светодиодов. Первый 1000-часовой срок службы измерения не включается в расчёты, используются последние 5000 часов 6000-часового измерения. Для того чтобы измерить температурный режим светодиода согласно *ASSIST-2005*, рекомендуется проводить измерения путём подключения измерительного устройства (термопары) к точке пайки, если это возможно. *ASSIST* определяет температуру точки пайки как 45, 65 и 85 °C для мощных светодиодных чипов с током питания более 100 мА. Значения светового потока, полученные в конце первых 1000 часов измерений, нормируются как 100 %. По истечении 6000 часов изменение светового потока сравнивается со значением, полученным после первых 1000 часов. Публикации *ASSIST* описывают структуру измерений срока службы светодиодов, хотя использование некоторых методов измерений и расчёта необязательно в полной мере [6].

## 2. Параметры светильников со светодиодами

Сегодня мы живём в период, когда энергоэффективность очень важна. С увеличением численности населе-

ния потребление энергии растёт все время. По этой причине от неэффективных методов, приводящих к потреблению энергии, отказываются и ищут эффективные методы. С этой целью опробовано множество энергоэффективных методов как для улучшения эксплуатационных показателей, так и для автоматизации и интеллектуального освещения. Главная цель здесь – это более эффективное использование энергии. По этой причине был проведён поиск решений проблем светодиодов, обеспечивающих энергоэффективность освещения [7–14].

Поскольку эффективность источника света зависит от температуры в светодиодных светильниках, очень важен предварительный тепловой анализ. Параметрами, влияющими на тепловую конструкцию светодиодного светильника, являются материал корпуса светильника, печатная плата, материал теплопроводящих промежуточных наполнителей (например, термопасты), тепловая мощность светодиода и температура окружающей среды.

Анализ температурного режима в светильниках со светодиодами проводится как для печатной платы, на которой установлен светодиодный чип, так и для корпуса светильника. Потому что тепло, выделяемое светодиодным чипом, накапливается в корпусе светодиодного модуля из-за печатной платы. Для того чтобы тепло внутри корпуса светодиодной конструкции отводилось наружу, тепловое сопротивление должно быть минимальным. Эффективность напрямую зависит от правильного теплового менеджмента светильника, особенно того, в котором используются мощные светодиоды. Для анализа температурного режима работы светильника необходимо знать теплофизические свойства таких элементов, как светодиодный чип, термопаста, печатная плата, материал корпуса самого светильника. В результате для того, чтобы достичь оптимального значения эффективности светильника, которая позволяет выполнять требуемые критерии освещённости, необходимо подобрать оптическую систему в соответствии с выполняемой задачей и оптимизировать тепловой менеджмент.

Механизмы теплопередачи светодиодов отличаются от других источников света. Традиционные источники света обычно передают генерируемое тепло в окружающую среду посред-

Виды теплопередачи различных источников света

| Тип источника света                       | Излучение (%) | Конвекция (%) | Теплопроводность (%) |
|---|---------------|---------------|----------------------|
| Лампа накаливания                         | > 90          | < 5           | < 5                  |
| Люминесцентная лампа                      | 40            | 40            | 20                   |
| Газоразрядные лампы высокой интенсивности | > 90          | < 5           | < 5                  |
| Светодиод                                 | < 5           | < 5           | > 90                 |

ством излучения. Однако светодиоды передают тепло, которое они производят, с помощью теплопроводности. Это отличие требует поиска принципиально других решений при проектировании систем для работы со светодиодами. Для отвода тепла, генерируемого светодиодами, требуется «тепловой» путь. Поэтому проблема теплопроводности должна быть решена в конструкции светильника. Такие недостатки, как деградация люминофорного слоя, повреждение линз и разрушение пайки, встречаются при высокотемпературном воздействии в светодиодных модулях [15]. В своём исследовании по охлаждению светодиодов в 2006 году Джеймс Петроски сравнил традиционные источники света со светодиодными по их теплопередающим свойствам [16]. В табл. 1 приведены типы теплопередачи для источников света [17].

В данной работе были исследованы изменения свойств светодиодных источников света с изменением температуры. С этой целью для уличного светодиодного светильника для освещения дорог был проведён анализ температурного режима и расчёт методом конечных элементов в имитационной среде.

### 3. Тепловой расчёт светодиодного модуля

Тепло, выделяемое в светодиодах, влияет на их эффективность. По мере того, как ток драйвера, поступающий на светодиодный чип, увеличивается, электрическая мощность и световой поток растут. Однако по мере роста электрической мощности, также увеличивается выделение тепла. Поэтому для светодиодов, работающих на больших токах, требуются более широкие поверхности для отвода тепла, за счёт этого температура может быть снижена. Ведь эффективность светодиода уменьшается с повышением температуры. Большая часть тепла, производимая светодиодами, отводится через печатную плату на корпус светодиодного модуля или воздух внутри него. Это основные пути теплопередачи. Например, в мощных светодиодах теплопроводящая подложка основы корпуса выполнена из металла для того, чтобы эффективно отводить тепло в окружающий воздух. Кроме того, для снижения температуры светильника используются тепло-

проводящие промежуточные наполнители (термопаста или термогель), за счёт которых отводиться накопленной тепло и снижается температура соединений. Каждое соединение в конструкции светодиодного модуля должно быть выполнено с помощью пайки или заполнено теплопроводящим гелем или пастой. Чем выше теплопроводность этих тепловых промежуточных наполнителей, тем легче отводится тепло от светодиодов.

Параметры исследуемого температурного режима светильника приведены ниже [1–7]:

- температура окружающей среды: тепло от светодиодного чипа передаётся на корпус светодиодной конструкции (модуля) и рассеивается в окружающее пространство. Повышение температуры в светильнике приводит к тому, что срок службы светодиодов сокращается и они выходят из строя. Тепло, накопленное в корпусе светодиодного модуля, остаётся в нём, тем самым повышая температуру соединения. Для этого исследования температура окружающей среды в светильнике была выбрана равной 22 °С;

- тепловая мощность светодиодных чипов: часть электрической энергии в светодиодных чипах превращается в световую энергию, остальная часть выделяется в виде тепла. Для того чтобы светодиоды работали эффективно, это тепло должно быть отведено от них. Увеличение тепловой мощности светодиодного чипа увеличивает температуру *p-n*-переходов. В частности, температура *p-n*-перехода в светодиодных чипах, питаемых выше их номинальных токов, становится неблагоприятной с увеличением тепловой мощности. Известно, что высокая температура негативно влияет на эффективность светильников и срок службы светодиодов;

- материал корпуса светильника: существует несколько типов матери-

алов, позволяющих эффективно рассеивать тепло от светодиодов в окружающее пространство, за счёт этого свойства может быть снижена температура *p-n*-перехода. В этом исследовании в качестве материала корпуса для моделирования был выбран алюминий;

- печатная плата: печатные платы – это поверхность, на которой припаяны светодиоды или другие элементы, с помощью них на светодиоды поступает питающий ток от драйвера, поэтому происходит нагрев печатных плат;

- теплопроводящий промежуточный наполнитель: основное назначение теплопроводящего промежуточного наполнителя заключается в заполнении зазоров между соединяемыми поверхностями и предотвращении высоких температур, которые будут создаваться воздушными зазорами.

Именно по вышеописанным причинам рассматриваемые параметры важны для анализа температурного режима светильника. Причём тепловая мощность светодиодного чипа – это фактор, оказывающий наибольшее влияние на температуру *p-n*-перехода. Поэтому моделирование в программе *Ansys* проводилось в соответствии с этим подходом.

### 4. Моделирование и анализ эффективности

Тепловой менеджмент зависит от температуры *p-n*-перехода светодиодов. Известно, что световой поток уменьшается с повышением температуры на светодиодах. В каталогах по светодиодным чипам обычно указывается световой поток для температуры *p-n*-перехода при окружающей температуре 25 °С. Эти значения (которые также называются в литературе «холодным» световым потоком) являются значениями светового по-

Таблица 2

Свойства материалов, используемых в сценарии (A1 – P1)

| Материалы для моделирования | Плотность, кг/м <sup>3</sup> | Изотропная теплопроводность, Вт/(м·°C) | Удельная теплоёмкость, Дж/(кг·°C) |
|-----------------------------|------------------------------|--|-----------------------------------|
| Полиэтилен                  | 950                          | 0,28                                   | 950                               |
| Алюминий                    | 2689                         | 237,5                                  | 951                               |

Рис. 1. Изображение светодиодного модуля для сценария (A1 – P1) безвоздушного потока, вид спереди (а), вид слева (б), вид снизу (в) и общий вид (г)

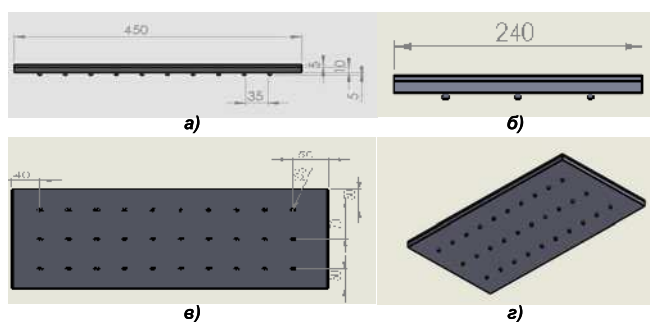
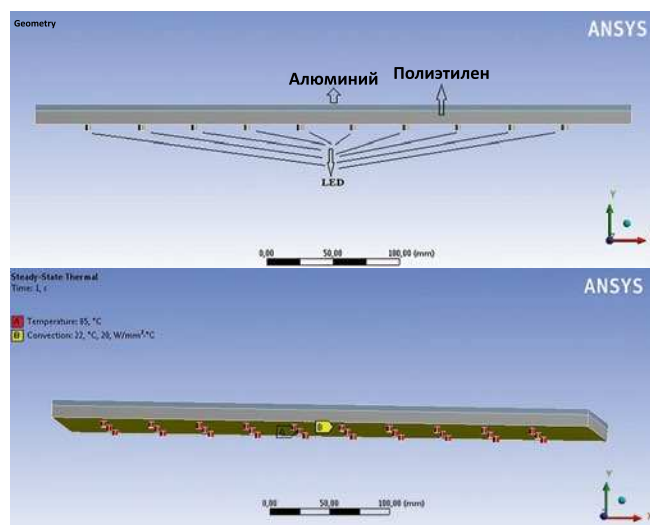


Рис. 2. Расчёт модуля в программе Ansys для безвоздушного сценария (A1 – P1)



тока, полученными в результате импульсных токов в диапазоне 10 и 20 мс, которые подаются на ленту при производстве светодиодов [18]. При этих измерениях светодиоды работают очень короткое время, и, соответственно, повышение температуры *p-n*-перехода не наблюдается. Светодиоды, измеренные до достижения теплового равновесия, показывают более низкую эффективность в реальных условиях эксплуатации [19]. При разработке светильника для расчёта светового потока, который будет приближён к реальным значениям, температуру *p-n*-перехода обычно принимают 85 °C. В данном исследовании начальная температура светодиодного светильника была смоделирована согласно температуре *p-n*-перехода при температуре окружающей среды 22 °C и для случая с максимальной температурой *p-n*-перехода при

85 °C. Предполагается, что моделируемый светодиодный светильник работает идеально и эксплуатируется в диапазоне температур 22–85 °C. Принимаем этот светильник со светодиодами за безотказный качественный осветительный прибор. При моделировании прибора, светильник и источник света оценивались как единое целое. Благодаря моделированию можно легко оценить внутреннюю температуру на корпусе светодиодного модуля или температуру *p-n*-перехода, что облегчает оценку светотехнических и цветовых характеристик светодиодов, используемых при этой температуре. Для анализа температуры *p-n*-перехода и теплового менеджмента в данном исследовании использовалась программа Ansys. Предполагается, что тепло, выводимое от электронного элемента, выходит из точки *p-n*-перехода. При

моделировании считается, что часть тепла уходит вниз на печатную плату, а часть вверх в окружающую среду или на охлаждающий блок.

#### 4.1. Сценарии моделирования

В качестве уличного светильника со светодиодами была выбрана конструкция, состоящая из 2-слойного полиэтилена и алюминия. На поверхности полиэтилена расположено 30 светодиодных чипов. Толщина полиэтиленовой поверхности составляет 1 см. Верхняя охлаждающая поверхность имеет толщину 0,5 см (алюминий). Предполагая, что каждый светодиодный чип излучает температуру 85 °C, моделируются соответствующие граничные условия. Согласно моделированию с использованием метода конечных элементов, между этими двумя поверхностями нет воздушного зазора, так как это пространство заполняется термопастой или термогелем.

На рис. 1 представлен первый сценарий (A1 – P1) для расчёта светодиодного модуля, согласно которому пространство между поверхностями отсутствует (0 см) без воздушного потока.

На рис. 2 представлен расчёт в программе Ansys для безвоздушного сценария (A1 – P1), в котором участвуют два материала, из которых состоит модуль, а именно полиэтилен и алюминий. Свойства используемых материалов в первом сценарии (A1 – P1) приведены в табл. 2 [15].

Во втором рассматриваемом сценарии (A2 – P2) расстояние между поверхностями, полиэтиленовой и алюминиевой пластинами, составляет 0,5 см, также без воздушного потока. Периферия воздушного зазора между двумя поверхностями замкнута, так что воздушный поток отсутствует. В этой конструкции воздух проявляет изолирующий эффект, как при установке двойного стеклопакета. На рис. 3 представлен смоделированный светодиодный модуль для второго сценария с расстоянием между поверхностями 0,5 см. На рис. 4 представлен расчёт в программе Ansys получившейся трехэтажной конструкции для второго сценария (A2 – P2) с зазором между алюминием и полиэтиленом 0,5 см. Обратим внимание, что в этой конструкции нет воздушного потока. Свойства используемых мате-

Свойства материалов, используемых в сценарии (A2 – P2) и (A3 – P3)

| Материалы для моделирования | Плотность, кг/м <sup>3</sup> | Изотропная теплопроводность, Вт/(м·°C) | Удельная теплоёмкость, Дж/(кг·°C) |
|-----------------------------|------------------------------|--|-----------------------------------|
| Полиэтилен                  | 950                          | 0,28                                   | 950                               |
| Алюминий                    | 2689                         | 237,5                                  | 951                               |
| Воздух                      | 1,1614                       | 0,026                                  | 1007                              |

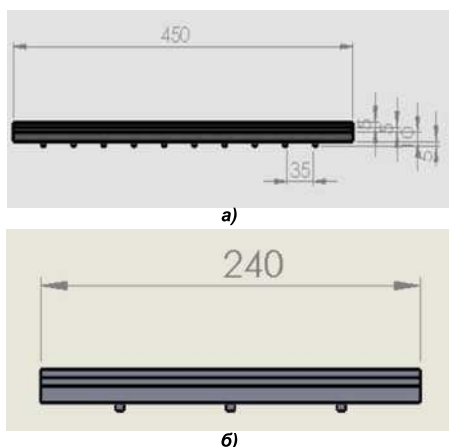


Рис. 3. Изображение светодиодного модуля для сценария (A2 – P2) безвоздушного потолка, вид спереди (а) и вид слева (б)

риалов во втором сценарии представлены в табл. 3.

Если положить, что все свойства материалов конструкции, представленной на рис. 4 равны значениям из табл. 3, то третий рассматриваемый сценарий (A3 – P3) расчёта будет при наличии воздушного потока между двумя пластинами с зазором 0,5 см.

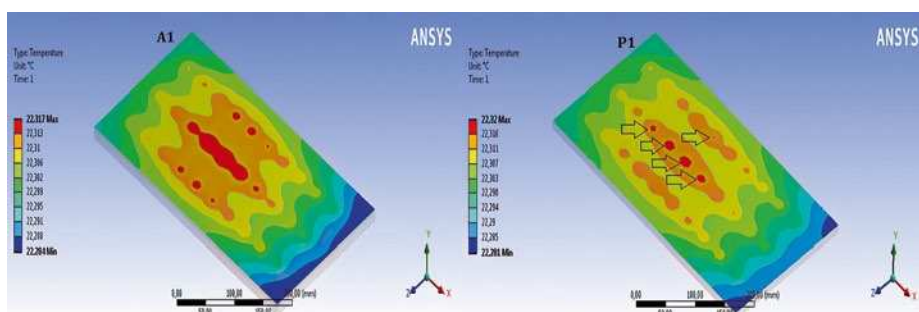
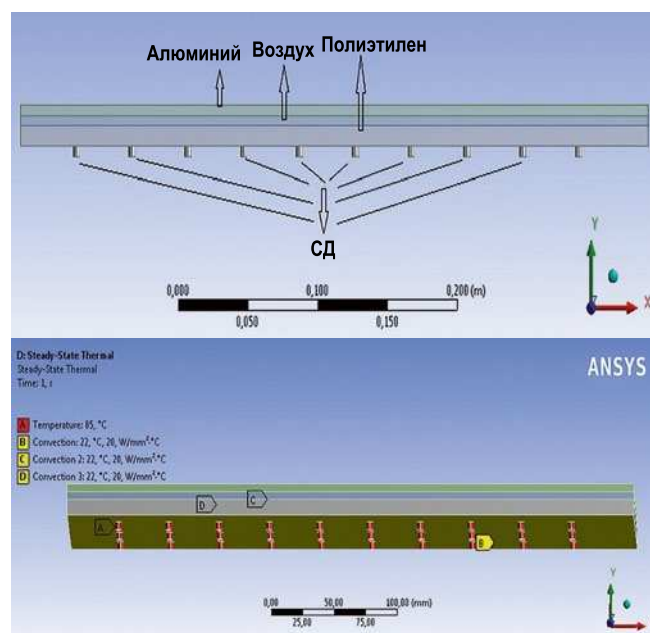
#### 4.2. Анализ эффективности моделирования

В данном исследовании анализируются три сценария теплового режима работы светодиодного модуля, а именно:

- расстояние между поверхностями 0 см без воздушного потока (A1 – P1);
- расстояние между поверхностями 0,5 см без воздушного потока (A2 – P2);
- расстояние между поверхностями 0,5 см с воздушным потоком (A3 – P3).

Моделирование было проведено с помощью метода конечных элементов. Результаты теплового расчёта для верхнего слоя алюминия (A1, A2, A3) и нижнего слоя полиэтиленовой поверхности (P1, P2, P3) представлены на рисунках ниже. На рис. 5 представлены результаты теплового расчёта в программе *Ansys* для первого сценария (A1 – P1).

Как можно увидеть из рис. 6, если есть воздушный зазор 0,5 см между верхней алюминиевой и нижней полиэтиленовой поверхностями, то тепло поднимается довольно быстро. Даже при том, что по условию второго сценария воздушного потока

Рис. 4. Расчёт модуля в программе *Ansys* для безвоздушного сценария (A2 – P2)Рис. 5. Результаты теплового расчёта в программе *Ansys* для сценария (A1 – P1)

в зазоре 0,5 см нет, граничное значение 22 °C на полиэтиленовой пластине нарушается, и температура растёт даже через 1 с. Так в сценарии (A2 – P2) наблюдалось, что температура достигала значения 22,46 °C в течение 1 с на алюминиевой пластине и значения 26,22 °C на полиэтиленовой пластине. Другими словами, независимо от порогового значения температуры, сработала теплоизоляция от воздушного пространства. Следовательно, такую конструкцию использовать не следует.

Из рис. 7 видно, что, если есть зазор между верхней алюминиевой и нижней полиэтиленовой поверх-

ностями 0,5 см с воздушным потоком, то количество тепла не увеличивается. Поскольку воздушный поток циркулировал в пространстве между пластинами, полиэтиленовая пластина подвергалась меньшему тепловому воздействию. При моделировании максимальная температура поднялась до значения 22,02 °C. В условиях, представленных на рис. 6, видно, что температура не будет повышаться на корпусе светильника при наличии воздушного потока. Пассивный метод охлаждения может быть использован для предотвращения нагрева светильников со светодиодами. Эту ситуацию можно увидеть на рис. 7. При усло-

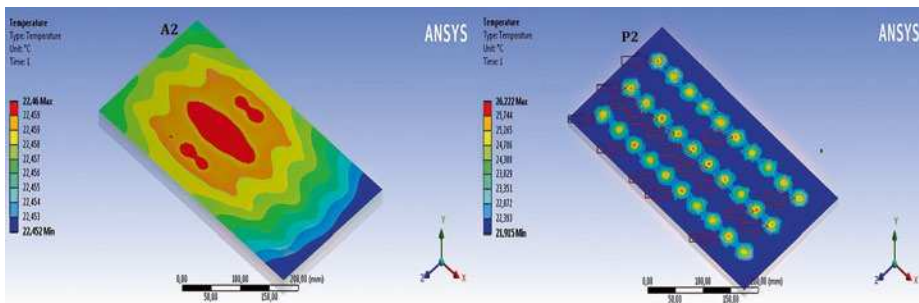


Рис. 6. Результаты теплового расчёта в программе Ansys для сценария (A2 – P2)

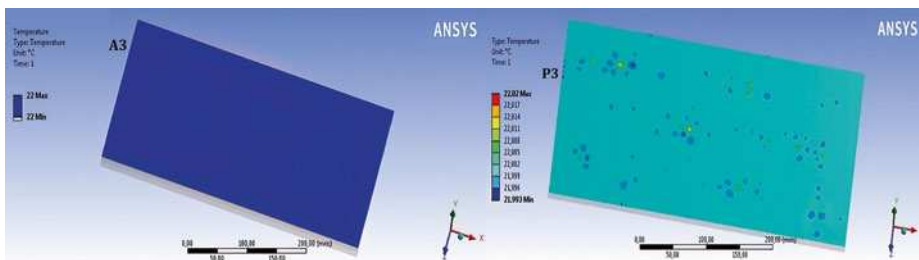


Рис. 7. Результаты теплового расчёта в программе Ansys для сценария (A3 – P3)

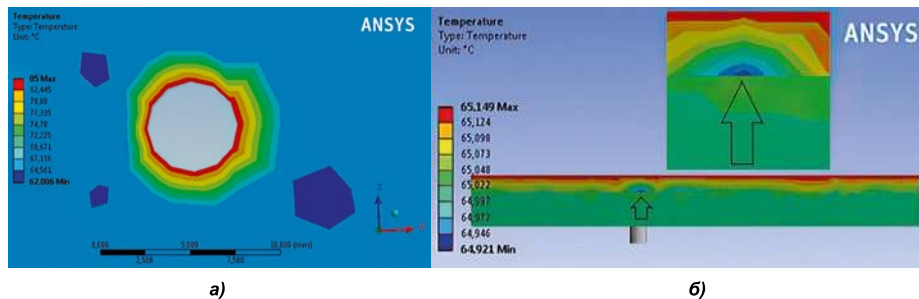


Рис. 8. Результаты теплового расчёта для светодиодного чипа вид сверху (а) и сбоку (б) для граничных условий температуры 65 °С

Рис. 9. Результаты теплового расчёта для передней части светильника для граничных условий температуры 65 °С

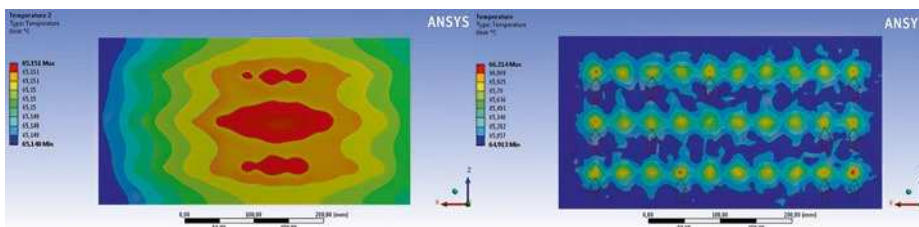
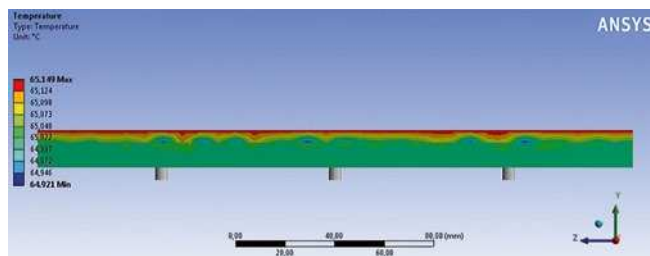


Рис. 10. Результаты теплового расчёта для сценария (A2 – P2) при температуре воздуха внутри корпуса 65 °С

вии соблюдения стандартов защиты от влаги и пыли светильник со светодиодами из сценария (A3 – P3), подверженный воздействию воздушных потоков, нагрев предотвращается. Из рис. 7 также видно, что алюминиевая поверхность не нагревается, и ни один

светодиод на поверхности полиэтилена не превышает порогового значения. Каким бы ни был зазор, он не изолирует воздух. Наоборот, за счёт него появляется воздушное охлаждение. В этом отношении вместо алюминия на верхней охлаждающей поверхно-

сти можно использовать более дешёвые материалы.

## 5. Результаты и обсуждения

При анализе рассмотренных сценариев было доказано, что наличие слоя воздушного зазора приводит к повышению температуры. Так воздушный зазор выполнял функцию теплоизоляции. Поэтому между алюминиевым слоем и полиэтиленовым слоем в светильниках со светодиодами не должно быть воздуха. Для этого следует использовать термопасту или термогель.

Как видно на рис. 5, пять светодиодов в центре имели превышающие пороговые значения температуры через 1 с. При этом, между алюминиевой и полиэтиленовой пластинами нет воздушного зазора. Понятно, что алюминиевый слой позволяет осуществлять достаточное охлаждение для отвода тепла.

Однако на рис. 6, пока воздух находится в закрытой зоне между алюминиевой теплопроводящей поверхностью и поверхностью полиэтилена, охлаждение не происходит. Потому что воздух – это очень хороший изоляционный материал. Если поток воздуха не возникает, то есть если воздух внутри неподвижен, то видно, что полиэтиленовая пластина подвергается большему нагреву. Как видно на рис. 6, 17 светодиодов превысили пороговое значение температуры, указанное в моделировании, за 1 с. По мере того, как светодиодный модуль работает, температура будет продолжать увеличиваться, и понятно, что будут достигнуты температуры, которые ухудшат работу светодиода, независимо от порогового значения температуры.

Моделирование было также проведено для температуры 65 °С, которая указана в стандартах ASSIST. Так пороговое значение температуры для расчёта в тех же условиях, что представлены на рис. 6, то есть в замкнутой области, было установлено на уровне 65 °С. Рис. 8 показывает верхнее и боковое тепловыделение для светодиодного чипа.

Как видно на рис. 9, когда температура воздуха внутри корпуса рассматриваемого СД модуля составляет 65 °С, происходит нагрев теплопроводящей алюминиевой поверхности. Из-за изоляции воздуха в закрытой зоне температура превышает пороговое

значение за 1 с. И так, как только светодиоды заработали, начался нагрев. Это показывает, что температура будет увеличиваться с течением времени. Поскольку воздух находится в закрытом пространстве, он не передаёт тепло наружу, возникает эффект двойного стеклопакета. Тепло, выделяемое светодиодами чипами, увеличивается на полиэтиленовом слое и приводит к выходу светодиодов из строя. Воздух создаёт теплоизоляцию для алюминиевой поверхности, поэтому алюминий не может отводить тепло. На рис. 9 представлено распределение тепла передней части светодиодного светильника.

На рис. 10, видно, что алюминиевая поверхность нагревается гораздо больше при температуре воздуха в помещении 65 °С. Однако присутствует эффект воздушной изоляции, поэтому скорость теплопередачи уменьшается. Соответственно, видно, что 12 светодиодных чипов за 1 с превышают граничное значение 65 °С. Очевидно, что со временем эта температура будет слишком сильно повышаться и приводить к выходу из строя светодиодов. На рис. 10 показано распределение температуры на алюминиевой и полиэтиленовой пластинах для сценария (A2 – P2) (температура воздуха внутри корпуса 65 °С).

## 6. Заключение

Основными факторами, влияющими на температуру *p-n*-перехода, являются температура окружающей среды и тепловая мощность светодиодного чипа.

В этом исследовании светодиодные чипы нагревают поверхность полиэтилена и воздух внутри светильника. Поэтому светодиодные чипы на поверхности полиэтилена, которые становятся слишком горячими, разрушаются. Если нет движения воздушного потока через воздушный зазор между слоями, то воздух действует как изолятор, что приводит к повышению температуры. Поэтому между алюминиевыми и полиэтиленовыми пластинами не должно быть зазора. Если есть зазор, нагрев можно предотвратить с помощью его заполнения термопастой или термогелем.

Кроме того, тепло можно уменьшить, применяя пассивное охлаждение в светодиодных конструкциях. Его можно обеспечить за счёт создания

воздушного потока в зазорах. Такая ситуация иллюстрируется при моделировании сценария (A3 – P3) на рис. 7.

Тепловая мощность светодиодного чипа является наиболее важным параметром, влияющим на эффективность. По мере увеличения тепловой мощности светодиодного чипа количество выделяемого тепла увеличивается. Если рассматривать устройство светодиода в качестве целостной системы, тепло, излучаемое светодиодным чипом, передаётся на корпус светодиодной конструкции, а затем отводится в окружающее воздушное пространство. Повышение тепла на корпусе светодиодной конструкции (модуля) в закрытом внутреннем пространстве вызывает его выход из строя. Эту ситуацию можно увидеть из результатов расчёта сценария (A2 – P2) на рис. 6 и рис. 10.

Как основной вывод из вышеизложенного, в мощных светильниках со светодиодами важен каждый из рассмотренных параметров.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Yurtseven M.B., Mete, S. ve Onaygil, S.* The effects of temperature and driving current on the key parameters of commercially available, high-power, white LEDs // *Lighting Research and Technology*, 2016. V48, #8, pp. 943–965.
2. *Jayawardena A., Liu Y. Narendran N.,* Analysis of three different junction temperature estimation methods for AC LEDs // *Solid State Electronics*, 2013. V86, pp. 11–16.
3. *Yurtseven M.B.* LED Işık Kaynaklı Armatür Isıl Modellenmesi ve Isıl Tasarımı Etkileyen Faktörlerin İstatistiksel Analizi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Doktora Tezi, Haziran 2017.
4. *Yurtseven M.B., Onaygil S. Oğus G.* Thermal simulation and validation of LED based luminaires using two-resistor compact thermal model // *Lighting Research and Technology*, 2014. V46, #5, pp. 576–586.
5. *Cengiz M. S.* Thermal Design Calculations for LED Luminaires // *International Journal of Engineering Research and Development*, 2018. V10, #2, pp. 69–75.
6. ASSIST Assist Program. 2020, <http://www.lrc.rpi.edu/programs/solidState/ASSIST/index.asp>
7. *Çibuk M. Cengiz M.S.,* Determination of Energy Consumption According To Wireless Network Topologies In Grid-Free Lighting Systems // *Light & Engineering*, 2020. V28, #2, pp. 67–76.
8. *Çibuk M.* Reducing Energy Consumption in Single-Hop and Multi-Hop Topologies of Road Lighting Communication Network // *Light & Engineering*, 2020. V28, #4.

9. *Efe S. B.* UPFC Based Real-Time Optimization of Power Systems for Dynamic Voltage Regulation. // *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2018. V116, #3, pp. 391–406.

10. *Efe S. B., Cebeci M.,* Power Flow Analysis by Artificial Neural Network. // *International Journal of Energy and Power Engineering*, 2013. V2, #6, pp. 204–208.

11. *Cengiz M. S.* Simulation and Design Study for Interior Zone Luminance In Tunnel Lighting. // *Light & Engineering*, 2019. V27, #2, pp. 42–51.

12. *Cengiz M. S.* Effects of Luminaire Angle and Illumination Topology On Illumination Parameters In Road Lighting. // *Light & Engineering*, 2020. V28, #4.

13. *Cengiz M. S., Cengiz Ç.* Numerical Analysis of Tunnel LED Lighting Maintenance Factor. // *IJUM Engineering Journal*, 2018. V19, #2, pp. 154–163.

14. *Cengiz M. S.* The Relationship between Maintenance Factor and Lighting Level in Tunnel Lighting. // *Light & Engineering*, 2019. V27, #3, pp. 75–88.

15. *Poppe A. Lasance C.J.* On the standardization of thermal characterization of LEDs. // *Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2009* 25th Annual IEEE, 15–19 Mart 2009, San Jose, CA, ABD.

16. *Petroski J.* Thermal Challenges In LED Cooling. 2020, <https://www.electronics-cooling.com/2006/11/thermal-challenges-in-led-cooling/>

17. ANSYS: Engineering Simulation & 3D Design Software, <https://www.ansys.com/>, 2020.

18. Oms Lighting (2014). Cold lumens versus hot lumens. <http://www.omslighting.com/ledacademy/5794-leds-controls/41-coldlumens-versus-hot-lumens>

19. *Ateş S., Yurtseven M.B., Onaygil S.* Design Of A Chip On Board (COB) LED Based Industrial Luminaire With Thermal Simulations. // *Light & Engineering*, 2019. V27, #2, pp. 78–87.



**Мехмет Саид Сенгуз (Mehmet Sait Cengiz), Ph.D.** (2016 г.). Работает в Университете Битлис Ерен, Турция. Область научных интересов: прикладные вопросы освещения



**Седа Йеткин (Seda Yetkin), MSc.** (2017 г.). Аспирант в Университете Фират на кафедре машиностроения. Работает преподавателем в Университете Битлис Ерен, Турция