

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники
(наименование института полностью)

Кафедра «Промышленная электроника»
(наименование кафедры)

11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника»
(код и наименование направления подготовки)

Проектирование интеллектуальных систем зданий и сооружений
(направленность (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Оптимизация теплового режима работы светодиодного светильника

Студент И.А. Шипицин _____
(И.О. Фамилия) (личная подпись)

Научный В.А. Медведев _____
руководитель (И.О. Фамилия) (личная подпись)

Руководитель программы к.т.н., доцент, А.А. Шевцов _____
(ученая степень, звание, И.О.Фамилия) (личная подпись)

« ____ » _____ 20 ____ г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой к.т.н., доцент, А.А. Шевцов _____
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) (личная подпись)

Тольятти 2019

Оглавление

Введение.....	4
1 Рассмотрение теоретической информации о конструкциях и тепловых режимах современных светодиодных светильниках.....	7
1.1 Принудительное охлаждение воздушным потоком.....	9
1.2 Принудительное охлаждение жидкостным элементом.....	10
1.3 Естественное воздушное охлаждение.....	12
1.3.1 Радиаторы – охладители, изготовленные методом штамповки.....	12
1.3.2 Корпуса – охладители, полученные методом литья.....	15
1.3.3 Радиаторы полученные методом экструзии.....	16
1.4 Современные решения отвода тепловой мощности от высокомоощных СИД.....	17
1.4.1 Фронтальное охлаждение.....	18
1.4.2 Охлаждение посредством сквозного переноса тепловых масс.....	19
1.4.3 Подбор сырья, необходимого при производстве охладителей.....	21
1.4.4 Экспериментальная проверка.....	22
1.5 Общая характеристика правил расчета теплового режима.....	25
1.6 Выводы по главе 1.....	28
2 Тепловой расчет единичного светодиода.....	29
2.1 Составление тепловой схемы замещения и тепловой расчет единичного светодиода формульным методом.....	29
2.2 Экспериментальное исследование температуры нагрева единичного светодиод.....	34
2.3 Компьютерное моделирование тепловых процессов протекающих в единичном светодиоде в программной среде Solidworks Simulation.....	37
2.4 Анализ движения теплового потока «бобышки».....	42
2.5 Выводы по главе 2.....	44
3 Тепловой расчет светодиодного светильника.....	45

3.1 Описание технических параметров светодиодного светильника, выбранного для исследования.....	45
3.2 Составление тепловой схемы замещения и тепловой расчет единичного светодиода формульным методом.....	48
3.3 Экспериментальное исследование температуры нагрева единичного светодиода.....	53
3.3.1 Измерение температуры термопарой.....	53
3.3.2 Измерение температуры тепловизером.....	58
3.4 Компьютерное моделирование тепловых процессов, протекающих в светильнике.....	60
3.5 Выводы по главе 3.....	66
Заключение.....	67
Список использованных источников.....	69

Введение

Светодиодная светотехника в современном мире в значительной степени набирает обороты, и постепенно вытесняет привычные источники искусственного освещения. Такой рост объясняется группой причин, где далеко не крайней является и экологические нормативные документы, сохранение и охрана окружающей среды. Светоизлучающие диоды (СИД) более эффективны по сравнению с традиционными «лампочками Ильича» и гораздо менее вредные при утилизации, чем люминесцентные световые приборы. Также некоторые выходные параметры СИД имеют возможность корректировки (цветовая температура, яркость и т.д.). Следствием из этого можно сказать, что СИД являются достаточно гибким источником света, позволяющим использовать их для промышленных, профессиональных и бытовых нужд (рисунок 1).



Рисунок 1 – Модель теплового исследования лампы бытового использования

В действительности, срок службы светодиодного светового прибора, заявляемый производителями (обычно от 25 000 до 50 000 часов) в некоторых случаях не достигается. Либо он выходит из строя, либо ощутимо снижаются с

течением времени световые характеристики устройства. Эксплуатационные характеристики (качество и количество излучаемого света, срока службы, стабильность цвета и другие параметры) тесно связаны с температурным режимом внутри светильника или светодиодной лампочки, которая по форме является аналогом лампе накаливания. Температурный параметр области, в которой установлен светильник, напрямую воздействует на рассеивание тепловой мощности кристалла радиатором – охладителем светодиодного светильника.

Еще одним фактором, оказывающим негативное воздействие на длительный срок службы, является рыночный спрос на миниатюризацию светодиодной продукции. В некоторых областях применения светотехнических изделий имеется потребность в изготовлении небольших размеров светодиодных светильников, в свою очередь простых в перемещении и не способствующих препятствием для выполнения основной деятельности. С целью сохранения формы привычных конструкций источников света имеется и спрос на замещение аналогичными светодиодными конструктивными решениями. Так же из этого следует необходимость по предложению решения расположения пуска – регулирующей аппаратуры в оболочке светового устройства, а в случае направленного освещения – еще и линзы.

Основной задачей пуска – регулирующей аппаратуры это выпрямление переменного тока с целью подачи требуемого питания на СИД, а также для выдачи световым приборам максимально – возможных световых параметров.

Стоит отметить, что лишь 20% мощности светодиодного кристалла направляется в свет, остальные 80% выделяются в тепло. В случае, когда теплообразующие элементы находится в малом замкнутом пространстве, происходит быстрый нагрев и в результате перегрев прибора. Разброс максимальной температуры работоспособности светодиода в зависимости от параметров светодиода колеблется в пределах 110÷150 °С. Номинальная рабочая температура, при которой кристалл хорошо себя чувствует, составляет порядка 85 °С. Трудности возникают при разработке светодиодной продукции с целью компоновки всех компонентов в ограниченном пространстве с учетом недопущения превышения

номинальных температурных параметров продукта. Решением проблемы может послужить использование программных сред моделирования для расчета тепломенеджмента светодиодной продукции. Особенно эффективен данный прием будет на всех стадиях разработки проектной модели устройства.

Цель магистерской диссертации помочь решить проблемы регулирования тепловых режимов и показать, как компьютерное тепловое моделирование способно помочь в достижении проектных целей в части надежности, размеров, формы и эксплуатационных характеристик изделия еще на стадии проектирования. Тем самым значительно снижая финансовые и временные затраты на выполнение проекта.

Основная задача работы состоит в определении и сравнении температурного режима работы на реально существующем светодиодном светильнике при помощи трех различных подходов:

- 1) Формульный метод;
- 2) Физический эксперимент;
- 3) Компьютерное моделирование.

Проделанная работа покажет насколько эффективно применение компьютерного теплового моделирования.

1 Рассмотрение теоретической информации о конструкциях и тепловых режимах современных светодиодных светильниках

Как уже отмечалось выше, области использования светодиодной техники в настоящее время различны. Причем применяют их, начиная от потолочного или декоративного освещения офиса или жилого дома до прожекторного освещения стадионов или фасадного освещения крупных торговых центров и зданий. Тем самым растет разнообразие применяемых светодиодных светильников по своей форме и световой функциональности. Значительное продвижения в проектировании светодиодной продукции, прилично большой мощности светоизлучения, дает возможность вхождения в область интересов светотехнической продукции, тем самым намекая на полное вытеснение с рынка привычных источников света.

Однако характеристики светоизлучающих диодов (СИД) напрямую зависят от условий эксплуатации и температуры окружающего воздуха в области, где они установлены. Вследствие повышения температуры кристалла светодиода выше номинальной происходит снижение световых параметров СИД и деградация кристалла. Тем самым срок работы светодиодов резко снижается. Поэтому конструкция светоизлучающего прибора должна быть оптимизирована с точки зрения минимизации температуры кристалла. Этот вопрос в светодиодном мире является одним из важнейших.

Путь следование тепла от кристалла светодиода в окружающую среду имеет последовательность, представленную на рисунках 2 и 3. Тепло начинает свое распространение от кристалла к связующему веществу, электроду, припою, плате, корпус – радиатор в окружающую среду. Тепло проходит через множество тепловых сопротивлений материалов на пути «кристалл – окружающая среда». Это и является существенным недостатком конструктива светодиодных светильников. При проектировании и разработке светодиодной продукции стараются минимизировать суммарное тепловое сопротивление.

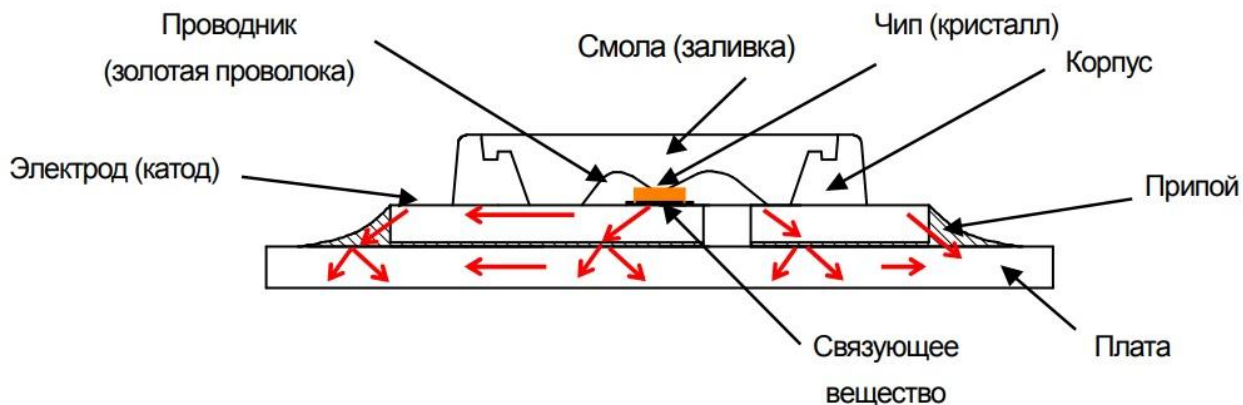


Рисунок 2 – Путь распространения тепла в по структуре светоизлучающего диода.

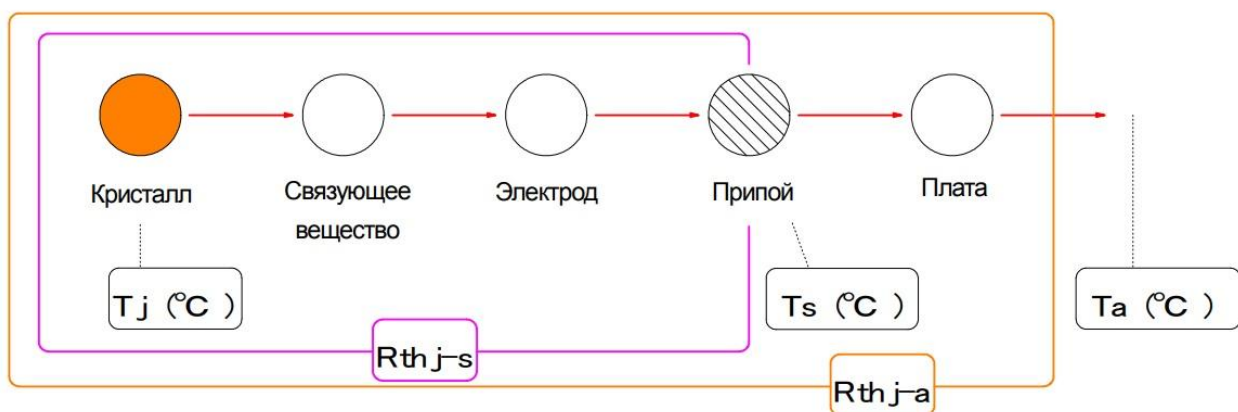


Рисунок 3 – Схема последовательности процесса распространения тепла

Наряду с широко известными традиционными материалами для изготовления печатных плат используются комбинированные структуры MC PCB (Metal Core PCB). Комбинированная структура MC PCB – это структура, состоящая из теплоотводящего основания (0,5 – 3,2 мм), например из алюминия, меди или их сплавов, на котором расположен теплопроводящий диэлектрический слой с высокой электрической прочностью (17 – 150 мкм), ламинированный, например, медной фольгой (35 – 350 мкм).

Важную роль имеет и собственное тепловое сопротивление СИД. В зависимости от применения технологичных процессов при изготовлении и материалов собственное тепловое сопротивление светоизлучающих диодов колеблется от 4 К/Вт до 20 К/Вт.

В связи с не гладкой поверхностью радиаторов охлаждения возникает барьер для прохождения тепла в сборочном элементе печатная плата – корпус. В таком месте необходимо устранение пустотелых мест применением теплопроводящих термопаст или смежных материалов.

Наиболее часто встречаются светодиодные светильники, спроектированные с ребристыми радиаторами, тепловой режим, которого достаточно прост в расчете. Однако такое решение не позволяет оценить конструктивные решения охладителя с точки зрения обтекания воздушными конвективными потоками. А также не имеется возможности оценить воздушные застои и взаимосвязь между теплопроводящими свойствами выбранных материалов при распределении тепловой мощности. Эту задачу позволяют решить средства автоматизированного проектирования еще на стадии разработки светодиодного светильника.

Значительным неудобством светоизлучающей техники является приличные размеры, что создает рамки для необходимости применения менее громоздких световых устройств. Решением этой проблемы является применение методов принудительного воздушного охлаждения и жидкостного охлаждения светодиодной техники:

а) жидкостное охлаждение. Такое решения для охлаждения целесообразно применять для светодиодной продукции мощностью превышающей 100 и выше Ватт;

б) принудительное воздушное охлаждение. Такое решение для светодиодной продукции, мощность которых лежит в интервале от 60 до 100 Ватт.

1.1 Принудительное охлаждение воздушным потоком

Рисунок 4 демонстрирует модель принудительного охлаждения воздушным потоком СИД. Идеей такого метода является подключения вентилятора охлаждения через считываемую температуру светодиода устройства для регулирования скорости вращения вентилятора. Условием корректной работы устройства является расположение теплорегистрирующего устройства вблизи тепловыделяющего устройства, т.е. кристалл светодиода.

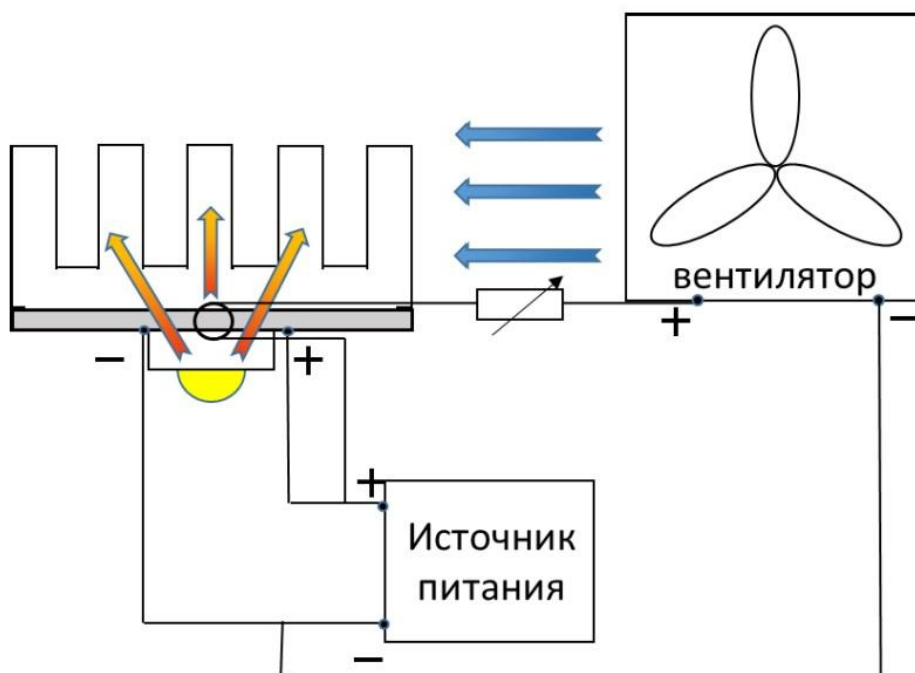


Рисунок 4 – Модель принудительного охлаждения воздушным потоком

Работа схемы заключается в простой последовательности. При нагреве кристалла светодиода выше установленной температуры увеличивается скорость обдува вентилятором. Как уже отмечалось выше, скорость охлаждающего устройства зависит от показаний температурного датчика. Такая схема является наиболее простой из существующих приёмов охлаждения.

Однако у такой системы есть и свои существенные недостатки. Со временем вентилятор загрязняется, а также происходит износ подшипника, что ведет к выходу из строя системы принудительного охлаждения и следствием перегрева и деградации кристалла светодиода. Также применение такой системы ведет к удорожанию изделия.

1.2 Принудительное охлаждение жидкостным элементом

При высокой удельной мощности более 100 Ватт воздушное охлаждение теряет свою эффективность. Таким образом, целесообразно применять принудительное охлаждение жидкостным элементом. Способ отвода тепла заключается к передаче его от нагреваемого элемента жидкости в результате их

контакта. Причем принудительное жидкостное охлаждение должно иметь циркуляцию охлаждающей жидкости. Такая система позволяет отводить на порядок выше тепла при сравнении с принудительным воздушным охлаждением. Тем самым позволяя делать светодиодные устройства меньших размеров при значительной мощности. Схема принудительного жидкостного охлаждения представлена на рисунке 5.

Модель принудительной системы жидкостного охлаждения имеет в своем составе: циркуляционный насос (помпу), теплообменник, радиатор, резервуар и соединяющие все эти части, гибкие шланги.

Однако при применении такого метода охлаждения СИД стоимость готового светильника может в 10 раз превзойти стоимость использования метода естественного воздушного охлаждения. К тому же надежность применения жидкостного охлаждения светодиодных устройств оставляет желать лучшего.

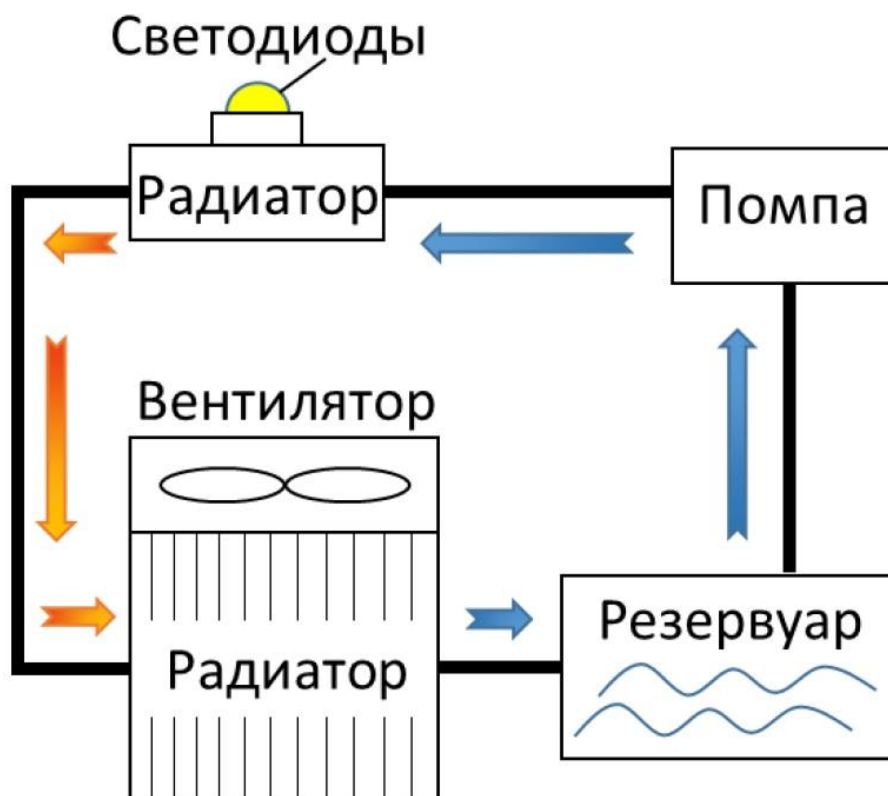


Рисунок 5 – Принудительное охлаждение жидкостным элементом

1.3 Естественное воздушное охлаждение

Пассивное охлаждение – наиболее распространенный метод охлаждения, применяемый при проектировании и производстве полупроводниковых светоизлучающих устройств. Пассивное охлаждение в результате зависит от корпуса-охладителя, материалы, для изготовления которого имеют высокий параметр теплопроводности. Так, значение тепловой проводимости медного материала порядка 390. Это, несомненно, является хорошим показателем. Однако алюминий имеет несколько преимуществ по сравнению с вышеописанным материалом. Его удельный вес в 3 раза меньше и стоимость в 5 раз дешевле. Алюминий в свою очередь имеет значение тепловой проводимости порядка 210. Стоит отметить, что удельный вес для светодиодной продукции, особенно для высокомоощных промышленных светильников является одним из ключевых при разработке.

Корпус – охладитель в мощных светодиодных светильниках служит для отвода тепловой мощности в окружение от полупроводникового кристалла СИД. Данный отвод тепла основывается на эффекте самопроизвольного рассеивания тепла в окружающем воздухе. Ключевым параметром корпуса – охладителя является площадь всей охлаждающей конструкции. КПД такого охладителя тем больше, чем больше площадь естественной конвекции. В месте соединения с печатной платой охладитель должен иметь менее шероховатую поверхность вследствие хорошей теплопередачи.

Известен не один из способов изготовления корпусов – охладителей для светодиодной продукции. Наиболее востребованными и повсеместными являются экструзионный, литьевой методы, а также метод штамповки. Разработка светодиодной продукции является не легкой задачей, так как при проектировании требуется учет различных показателей и параметров. В частности технологической и финансовой точек зрения.

1.3.1 Радиаторы – охладители, изготовленные методом штамповки

Радиаторы – охладители, произведенные методом штамповки имеют форму основания, на котором перпендикулярно к нему и параллельно между друг другом,

располагается большое количество пластин, рисунок 6. Описываемый способ производства корпусов – охладителей с точки зрения сложности полученной формы имеет ценность по сравнению с другими способами изготовления радиаторов. Процесс производства связан с высоким давлением, посредством которого имеется возможность, координируется структурный параметр зерна, что впоследствии благоприятно сказывается на теплопроводящем параметре изделия.



Рисунок 6 – Пример радиатора, выполненного методом штамповки

Недостатками такого метода изготовления радиатора – охладителя является наложение рамок с точки зрения производства ребристых элементов. Для штамповки используется пресс форма, имеющая в своем составе два довольно сложных по форменному параметру узла. Однако при создании изделий методом штамповки не требуется проведение дополнительных операций по сверлению отверстий, формирования фасок и т.д. Таким образом в сочетании с возможностью получения большей площади радиатора – охладителя без необходимости изменения размерных параметров в сторону увеличения, а также в связи с технологическим процессом и получение хороших теплопроводящих свойств штампованные конструкции имеют преимущество перед другими.

Такие особенности имеют значение при необходимости малых размеров устройства и/или где небольшая масса вводит ключевое значение при выборе.

Учитывая особенность основной отдачи тепловой мощности посредством пластинчатых элементов, данная конструкция радиатора будет лучше себя чувствовать при применении ее совместно с вентилярующим устройством. Это связано с тем, что ввиду малых зазоров между пластинами чревато застойные явления воздушного потока. Следовательно, КПД охлаждающего радиатора значительно снижается. Пример выполнения такого охладителя совместно с вентилярующим устройством имеет повсеместную реализацию в компьютерной технике. В основном, такая конструкция служит для охлаждения процессорных чипов (рисунок 7).

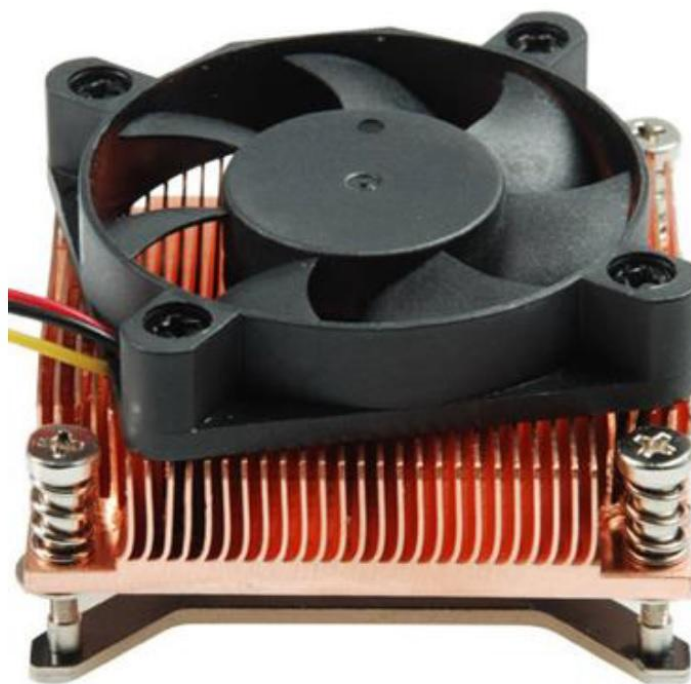


Рисунок 7 – Конструкция радиатора – охладителя для компьютерного процессора.

Стоит отметить, что охладители изготовленные таким методом следует применять только в замкнутых пространствах, так как при использовании в уличных условиях зазор между пластинами, да и сами пластины довольно быстро

оказываются покрытыми посторонними частицами пыли и т.п., что приводит к низкой эффективности при рассеянии тепловой мощности такой конструкции.

Еще одним недостатком такого метода изготовления является финансовые показатели для производства оснастки. Для изготовления разных форм, рассчитанных на разную мощность теплоотвода необходимы разные штампы – формы.

1.3.2 Корпуса – охладители, полученные методом литья

«Литые радиаторы изготавливаются методом литья под давлением расплавленного металла в кокиль» [4]. Главным плюсом изготовленных охладителей таким методом это отсутствие последующих вторичных обработочных операций. Таким образом, используя такой технологический процесс изготовления охладителя, имеется возможность получения сразу готового изделия с уже спроектированными отверстиями, фасками, округлениями, пазами и т.п. (рисунок 8).

Одним из недостатков такого метода является сравнительно наименьшая теплопроводящая способность. Это связано с технологическим процессом данного метода, а именно образования пористой структуры за счет охлаждения изделия в матричной структуре.



Рисунок 8 – Корпус – радиатор изготовленный литьем под давлением

Еще одним из недостатков такого метода, также как и при методе штамповки, значительные затраты на оснастку. Таким образом, для изготовления серийных светильников различных мощностей потребуется ни одна литевая форма.

1.3.3 Радиаторы полученные методом экструзии

Корпуса – охладители, произведенные методом экструзии, являются чаще всех встречающимися повсеместно. «Экструзия – технология получения изделий путем продавливания вязкого расплава материала или густой пасты через формирующее отверстие» [4]. Разного рода сплавные составы алюминия являются основой при изготовлении корпусов – охладителей. Преимуществом такого метода является возможность изготовления радиаторов с различными формами ребристости, что в свою очередь позволяет добиться более эффективного теплоотвода. К примеру, радиатор светильника взятого для исследования в данной магистерской диссертации как раз изготовлен данным методом (рисунок 9).

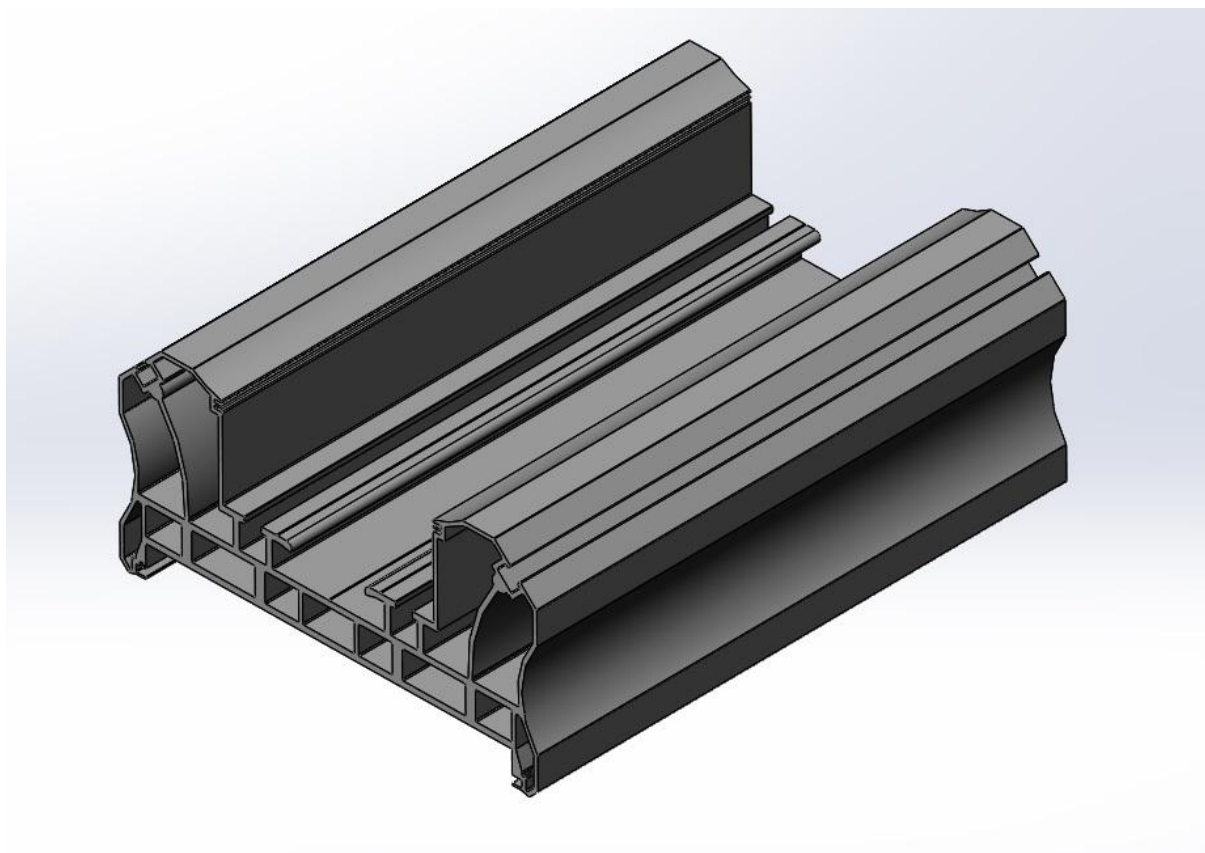


Рисунок 9 – Корпус – радиатор исследуемого светильника, полученный способом экструзии

Главный минус способа производства такого охладителя, это линейное свойство. В случае такого метода получение радиатора происходит выдавливание массы материала по единственной осевой линии. Тем самым возникает необходимость проведения вторичных обработочных операций.

Положительной стороной экструзионного способа изготовления радиатора является снятие ограничений длины возможного охладителя. Такое преимущество дает возможность изготовления радиаторов рассчитанных на разные тепловые мощности, меняя лишь его длину. Тем самым значительно снижаются капитальные затраты по сравнению с другими способами изготовления радиаторов.

1.4 Современные решения отвода тепловой мощности от высокомоощных СИД

«В абсолютном большинстве современных светодиодных конструкций реализована компоновка по правилу «кристалл: спереди стекло, сзади радиатор». Такая компоновка себя полностью оправдывала для предыдущего поколения маломощных LED. Для современных высокомоощных LED – кластеров такого подхода к охлаждению оказалось явно недостаточно. Ситуацию удалось частично решить за счет перехода на металлические печатные платы (Metal Core Printed Circuit Board). Тепло «разгонялось» по всей поверхности этих плат, увеличивалась площадь, на которой можно было бы разместить дополнительные радиаторы. Но и возможности этого решения из – за стремительного роста удельных генерирующих мощностей фактически уже исчерпаны» [3].

«Критический анализ существовавших подходов к проектированию систем охлаждения светильников и других тепловыделяющих электронных устройств позволил найти неиспользуемые до настоящего времени резервы в отводе тепла: это так называемые фронтальные и транзитные схемы отвода тепла. Обе они предназначены для интенсификации отвода тепла с лицевой, передней стороны печатных плат, на которых и смонтированы светодиоды» [3].

1.4.1 Фронтальное охлаждение

«Напомним, что под этим термином подразумевается отвод тепла с помощью специально сконструированных радиаторов охлаждения, располагаемых на фронтальной стороне МС РСВ (рисунок 10)» [3].

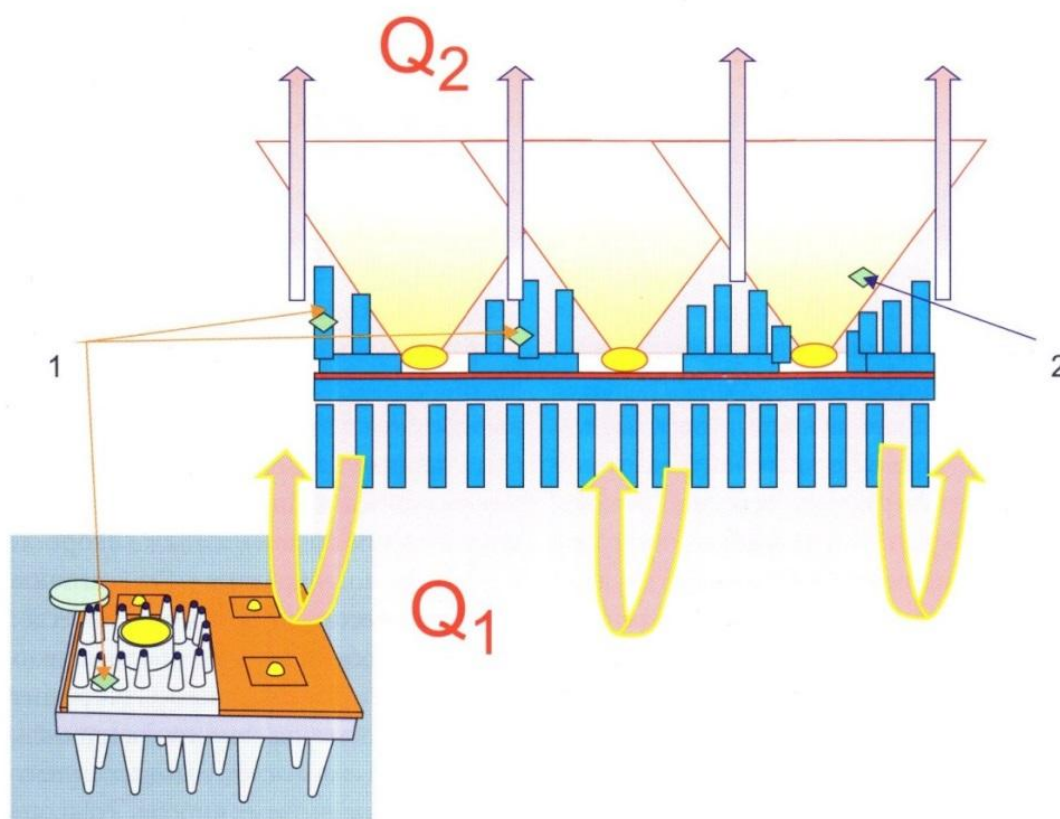


Рисунок 10 Размещение радиаторов на фронтальной стороне МС РСВ

Помимо выполнения теплоотводящей роли, такие радиаторы могут служить держателями для вторичной оптики светового прибора (рисунок 11). Вторичная оптика играет роль фокусировки, рассеивания световых лучей. Также такое конструктивное решение позволяет применять различную вторичную линзу разную для каждого СИД, что в конечном итоге дает возможность создание гибкого контроля световых излучений. В результате может быть получена такая форма КСС, создание которой в стандартных световых приборах вызовет приличные дополнительные затраты.

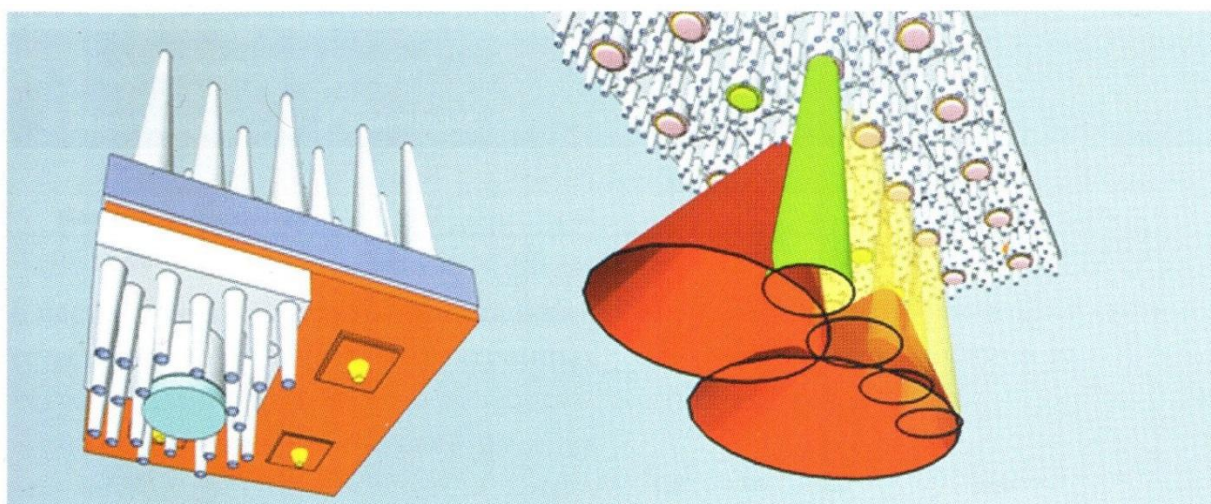


Рисунок 11 – Лицевые охладители в качестве держателя вторичной оптики

1.4.2 Охлаждение посредством сквозного переноса тепловых масс

В зависимости от размещения светового прибора относительно горизонтали по углу, изменяется обхватывание охладителя воздушными потоками вследствие различных параметров аэродинамики. Так, различие интенсивности обтекания воздушными потоками при расположении светового прибора вертикально имеет разницу в полтора раза по сравнению с горизонтальным расположением.

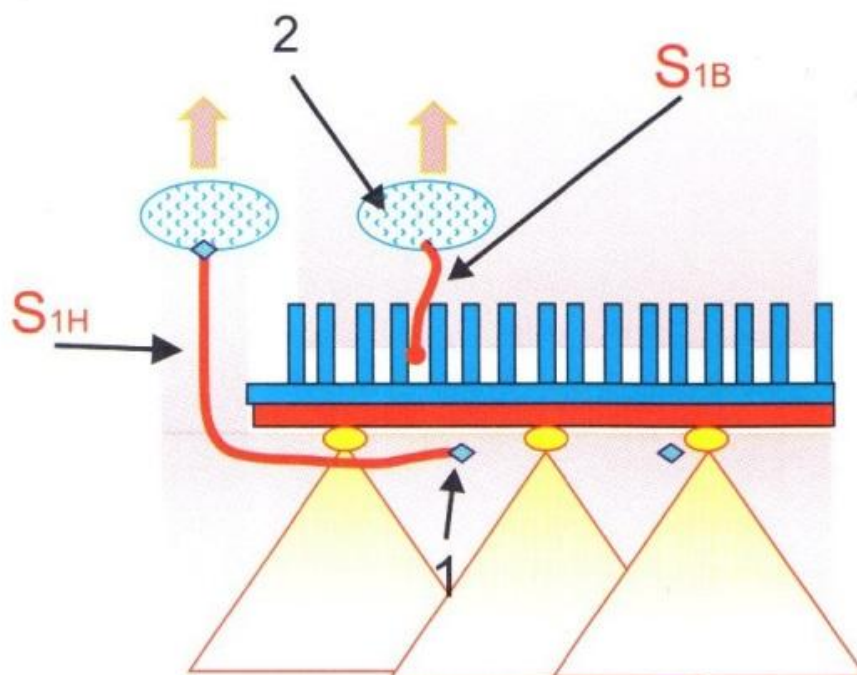


Рисунок 12 – Горизонтальная ориентация платы

В случае стандартной конструкции светодиодного модуля, потоку воздуха, который забирает тепло в ближней точке полупроводниковых приборов необходимо преодолевать более дальнее расстояние $S_{1н}$ при сравнении с длительности пути $S_{1в}$, что в свою очередь снижает КПД теплового взаимодействия с окружающими массами воздуха.

Для повышения эффективности теплорассеяния имеется возможность создания группы сквозных отверстий в светодиодном модуле с целью прохождения воздушных тепловых масс по более короткому пути S_2 (рисунок 13).

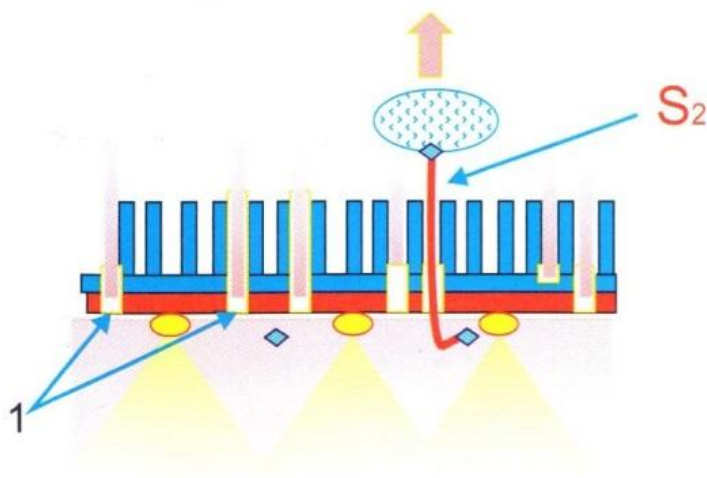


Рисунок 13 – Вариант отвода тепла

Для этого на тыльной поверхности печатной платы размещают радиаторы специальной формы со сквозными отверстиями для беспрепятственного прохода (транзита) горячего воздуха вверх. За счет этого сокращается путь S_2 до области смешения с холодным воздухом и, соответственно, интенсифицируется теплообмен. Места расположения на МС РСВ этих транзитных радиаторов зависят от конкретной топологии смонтированного на ней электронного устройства (отверстия не должны пересекаться с печатными дорожками).

Транзитные радиаторы (рисунок 14) могут иметь в конструкции пары соосных элементов: нижнего сопла 1, забирающего нижний теплый воздух, и верхней части 2, представляющей собой радиатор 3 с развернутой поверхностью и отверстием посередине.

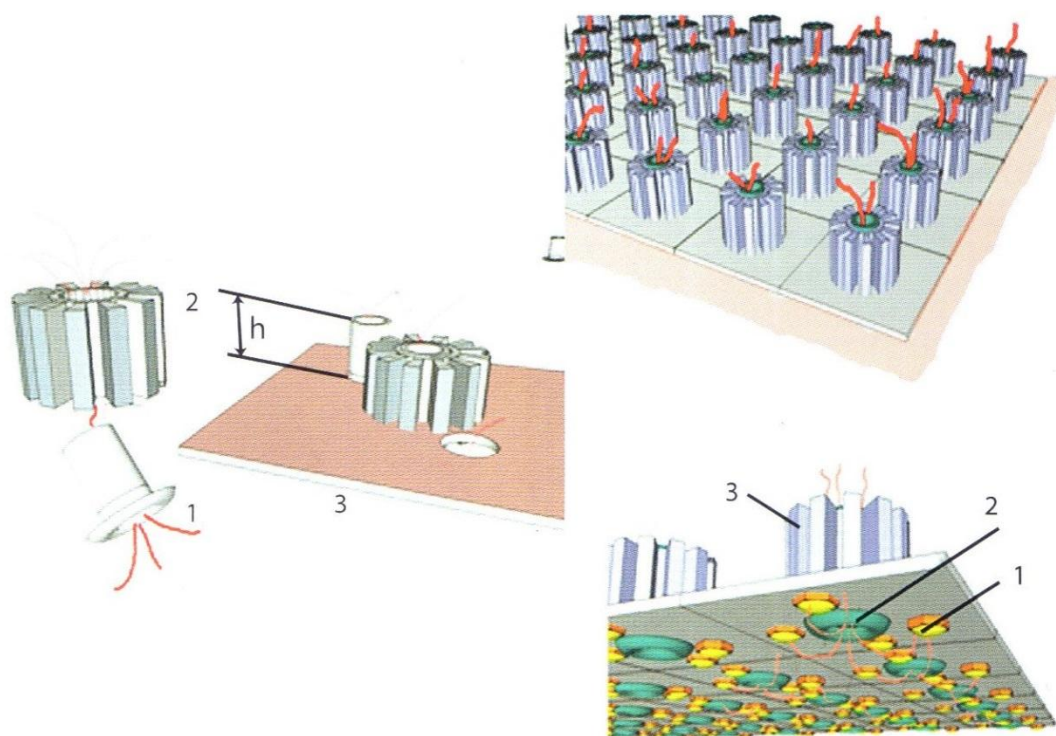


Рисунок 14 – Транзитный радиатор

Особенностью такой конструктивной элементной базой является усиления потока воздушных масс за счет высотного параметра h , создающего явление вытягивания воздуха. Любопытно, почему структурное сокращение высотного параметра до толщины охлаждающей платы МС РСВ радиатор морфологически преобразуется в отверстие сквозь эту плату.

1.4.3 Подбор сырья, необходимого при производстве охладителей

Сырье, использующееся при производстве таких сложных по форме и высокоточных радиаторов, должен удовлетворять как минимум трем условиям:

а) обладать теплопроводностью, необходимой и достаточной для подвода к охлаждающей поверхности такого количества теплоты, которое реально может «забрать» себе окружающий воздух в условиях естественного охлаждения. Расчеты и многочисленные эксперименты относят к ним материалы с теплопроводностью выше $7 - 10 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ – металлы и теплопроводящие пластмассы.

б) перерабатываться способами, имеющие высокие точности при их изготовлении, равными точности производства корпусных элементов устройств;

в) быть конкурентоспособным по себестоимости в условиях массового производства.

Недавно появившиеся на рынке теплопроводящие пластмассы обладают приближенной по теплоотдаче с алюминиевыми сплавами в условиях естественного способа охлаждения. Элементы светового прибора из теплоотводящих пластиков почти в два раза легче аналогичных алюминиевых, себестоимость их в три – пять раз меньше.

1.4.4 Экспериментальная проверка

В практической части проверки работы способа транзитного охлаждения применялась СОВ матрица, мощность которой составляла 25 Вт. Габаритные величины полупроводникового элемента 2x2 см, прикрепленного к подложечной части, изготовленной из алюминия размерами 4x4x0,1 см. Этот кластер был закреплен (рисунок 15) через теплопроводную пасту на алюминиевой пластине габаритами 16,5x16,5x0,18 мм. Роль охладителей выступали игольчатые охладители посредством модульной системы габаритами 5x5x2,5 см. Материал охладителей - полимерный композит «ТЕПЛОСТО Т6 –Э5 – 7» с теплопроводящими параметрами не менее 6 Вт/м·К.

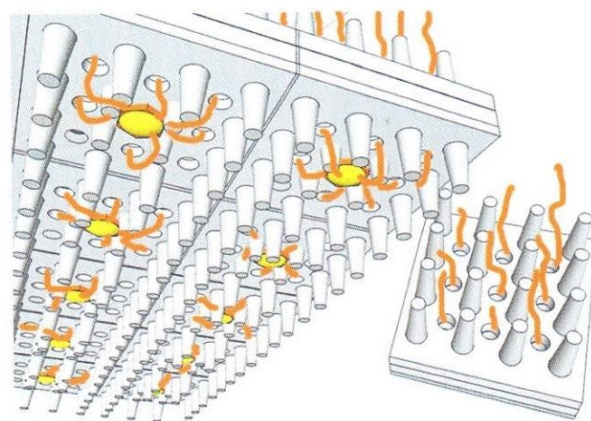


Рисунок 15 – а) кластер, закрепленный на алюминиевой пластине; б) игольчатые модульные охладители

Сквозной способ теплоотвода имел в конструкции двухсоставных соосных охладителей в количестве 76 штук, диаметр отверстия в которых составлял порядка 5,2 мм. Причем такие же сквозные соосные отверстия находились и основной пластине из алюминия. Общий высотный параметр такой конструкции был около 12 мм. Суммарная площадь транзитных проходов порядка 16 см², что составляло 6% часть от всех поверхности теплоотвода.

КПД теплоотвода анализируют по дельте температурного параметра среды, в которой находится прибор T_a и наиболее разогретой от тепловой мощности области светильника T_{max} . Принято считать такой точкой температурный параметр СИД $(T_{max} - T_a)$. Стоит отметить, что температура СИД имеет прямую зависимость от теплого сопротивления. Таким образом, чем меньше сопротивление, тем эффективнее теплоотвод.

Температура T_{max} измерялась термопарой внутри отверстия диаметром 1 мм, просверленного в центре алюминиевой платы, непосредственно под заводской подложкой кластера. Фиксировались значения температуры при установившемся тепловом режиме работы сборки (как правило, через полтора – два часа после начала эксперимента).

Отсчетным конструктивным исполнением принято стандартное исполнение - не имеющее сквозных отверстий для протока воздушных масс и имеющее оптическую часть в виде прозрачного экрана. Такое устройство показано под позицией №2 в рисунке 16. Такое исполнение с точки зрения теплоотводящих свойств показало себя хуже остальных. Максимальная нагретая точка составляла 80 градусов тепла по Цельсию (дельта 55 градусов по Цельсию).

Таким образом, можно сказать, что технология сквозных протоков воздушных масс оправдало свою эффективность. Она имеет достаточно простую в реализации конструкцию и не требует капитальных вложений.

На рисунке 18 приведены фото разных реальных конструкций LED – светоизлучающих устройств, с фронтальной системой охлаждения, изготовленных из теплорассеивающих пластмасс.

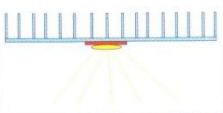

Схема охлаждения	$T_{max}, ^\circ C$	$T_{max}-T_{air}, ^\circ C$	Транзитное охлаждение	$T_{max}, ^\circ C$	$T_{max}-T_{air}, ^\circ C$	Эффективность снижения T_{max}	
						Абсолютная, $^\circ C$	Относительная, %
1 Открытая	+75	50		+71	46	-4	8%
2 С плафоном (традиционная)	+80	55		+74	49	-6	10%
3 Фронтальная	+71	46		+67	42	-4	8%

Рисунок 16 – Сравнение эффективности различных систем охлаждения

Схема охлаждения	$T_{max}, ^\circ C$	$T_{max}-T_{air}, ^\circ C$	Эффект снижения T_{max}	
			Абсолютная, $^\circ C$	Относительная, %
Традиционная	+80	55	0	0
Фронтальная	+71	46	-9	-16%
Фронтальная+транзитная	+67	42	-4	-24%

Рисунок 17 – Снижение температур кристаллов в различных системах охлаждения



Рисунок 18 – LED – светильники с фронтальной системой охлаждения

1.5 Общая характеристика правил расчета теплового режима

Традиционно большая часть работ по проектированию и разработке выполняется на основании практических правил расчета тепловых режимов конкретного компонента, печатной платы или готового узла. Поскольку процесс проектирования и разработки любого электронного изделия является итеративным, расчеты приходится повторять на всем его протяжении. На каждой стадии необходимо исправлять проектные недочеты, и даже при этом есть вероятность не заметить места перегрева. Каждое изменение – это дополнительная задержка и удорожание проекта, что грозит упущением благоприятной рыночной конъюнктуры.

К тому же относительно низкая точность этого подхода приводит к тому, что проектировщики предусматривают чрезмерно большой запас по регулированию тепловых режимов – например, используя излишне массивный радиатор, увеличивающий габариты и стоимость конечного продукта. Порой в изделие даже встраивают ненужный вентилятор, тем самым серьезно сокращая среднее время наработки на отказ – метрику прогнозируемого срока службы. Но еще важнее, пожалуй, то, что это может стать причиной скрытых проблем теплового характера, которые проявляются уже после ввода изделия в эксплуатацию. Потенциальные издержки, связанные с гарантийными рекламациями, заменой изделий и ущербом репутации фирмы, могут быть катастрофически высокими.

Таким образом, тепловое моделирование позволяет проектировать более компактные и экономичные изделия, которые работают лучше и служат дольше. Еще одно преимущество теплового моделирования – возможность сократить время проектной итерации, что позволяет опробовать множество вариантов регулирования тепловых режимов и, в конечном счете, быстрее вывести продукт на рынок.

Чем раньше в процессе проектирования выполняется тепловое моделирование, тем ниже риск, что в дальнейшем потребуются корректировать конструктивные элементы вследствие возникновения недостаточного теплоотводящего эффекта. На пути проектирования изделия инженерно – техническим работникам необходимо преодолевать этапы разработки, с точки

зрения тепловых процессов, находясь в одной команде. Тем самым, исключая недопонимание и ускорения процесса создания готового продукта. Изображение ниже демонстрирует связь и стратегию совместной работы.

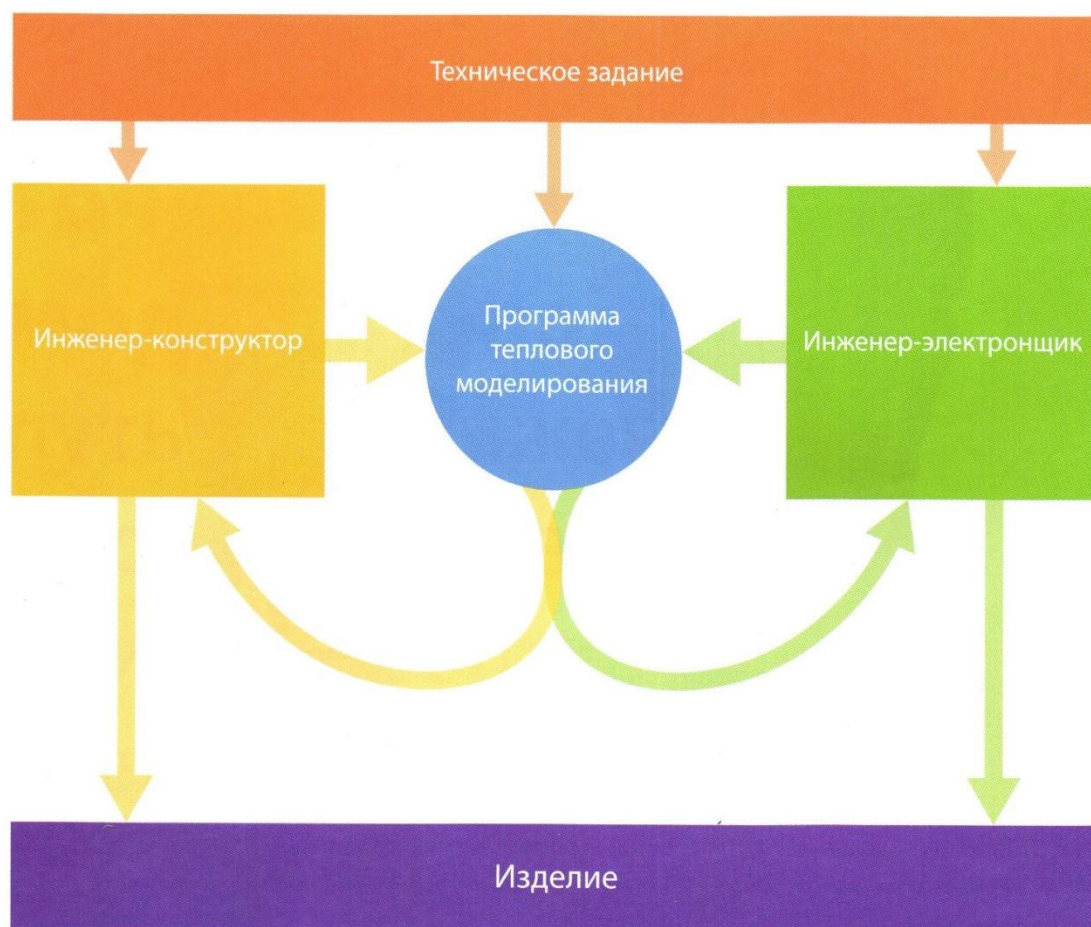


Рисунок 19 – Блок схема взаимодействия технических специалистов

Стартом проектирования может послужить создание упрощенной формы предполагаемого светодиодного светильника, где тепловыделяющие элементы сосредоточены в общем объеме. Такой прием дает возможность при малом затратах времени оценить возможность рассеяния тепловой мощности светодиодных модулей соответствующих заданию на проектирование. Общий теплоотвод спроектированной формы, размеры радиатора и воздушный поток вентилятора (если он используется). Такие данные будут получены в результате проведения прикидочного метода.

При дальнейшей стадии проектирования, в средство теплового моделирования необходимо ввести следующую информацию:

- 1) Сведения об элементах и их расположении на печатной плате;
- 2) Оценка рассеиваемой мощности наиболее значимых компонентов;
- 3) Размерный эскиз корпуса светильника.

Температурные графики, построенные по результатам моделирования, позволяют увидеть, в каких местах вероятно превышение максимально допустимой рабочей температуры элементов.

Чем точнее входные данные, тем точнее будет и моделирование. По результатам первоначального моделирования проектировщики печатных плат и инженеры – конструкторы могут составить представление об изменениях, способных улучшить тепловые характеристики светильника или лампы, т.е. провести оптимизацию. Этот процесс повторяется по ходу проекта.

Предлагаемый окончательный проект следует вновь подвергнуть тепловому моделированию до производства образца. Для проведения такого этапа проектирования с целью снижения погрешности тепловой имитации следует уточнить вспомогательные параметры:

- а) 3D – модель охладителя светоизлучающего светодиодного устройства, имеющие возможности переноса в различные программные среды моделирования;
- б) схемы печатных плат из САПР электронных устройств, которые можно импортировать в стандартных отраслевых форматах;
- в) сведения о параметрах СИД;
- г) сведения о характеристиках материалов светильника;
- д) обновленные оценки рассеиваемой мощности элементов светильника, полученные из инженерных расчетов.

После изготовления прототипа коллектив разработчиков проверяет точность моделирования путем физических измерений температуры. В зависимости от применения это могут быть термопары, датчики температуры, устанавливаемые на полупроводниковые кристаллы, или инфракрасные датчики.

В данном разделе описана методика последовательных шагов при проектировании светодиодного светильника. В данной магистерской диссертации ситуация немного иная. Необходимо исследовать уже ранее изготовленный образец

серийного промышленного светодиодного светильника мощностью 55 Вт. Однако расчет теплового режима начнем с более простого светодиодного прибора, имеющего всего один светодиод. Такое решение позволит глубже разобраться в программной среде моделирования и выполнить более точный расчет непосредственно сложного светодиодного устройства.

1.6 Выводы по главе 1

Значимость освещения светодиодной техникой повсеместно является ключевым трендом и задачей повсеместно с целью сохранения окружающей среды.

В результате проанализированной информации сделан вывод, что не смотря на свою высокую эффективность исследование теплового режим светодиодных светильников это острая задача с целью обеспечения долгой работы светового прибора.

Мощности светодиодных светильников, их световые характеристики, не останавливаясь, возрастают, что еще делает более трудноисполнимым отвод тепловой энергии от кристалла светодиода.

2 Тепловой расчет единичного светодиода

2.1 Составление тепловой схемы замещения и тепловой расчет единичного светодиода формульным методом

Прежде чем переходить к анализу теплового режима сложной конструкции был произведен расчет единичного светодиода, напаянного на плату, а также имеющего охладитель. Конструкция так называемой бобышки, представлена на рисунках 20 и 21.

Технические характеристики, представлены ниже:

- 1) Светодиод мощностью 0,5 Вт;
- 2) Потребляемый ток 175 мА;
- 3) Падение напряжения 3 В;
- 4) Материал охладителя – алюминий;
- 5) Плата, основание которой – алюминий.

Вспомним, что в свет уходит лишь 20% мощности светодиода, остающиеся 80% мощности – тепловая.

Проведя, расчет по исходным данным получим мощность, идущую на нагрев, которая составит 0,4 Вт. В расчетах будем использовать именно эту мощность.



Рисунок 20 – Внешний вид единичного светодиода с платой



Рисунок 21 – Внешний вид охладителя

Расчет температурного параметра $p - n$ перехода кристалла светодиода формульным методом начинается с построения схемы замещения. Такая схема представляет собой описание всех частей светодиодного прибора совокупностью связанных однородных тел. Тепловая схема замещения для исследуемого единичного светодиода представлена на рисунке 22.

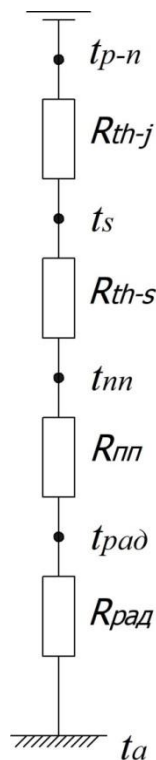


Рисунок 22 – Тепловая схема замещения рассчитываемого единичного светодиода

Исследуемый светодиод произведен компанией Edison Opto. Из DataSheet [1] на светодиод Edison Opto форм фактора 28x35мм, установленный на данном устройстве, известно тепловое сопротивление $R_{th-j} = 6 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$ – «кристалл – корпус», а также тепловое сопротивление $R_{th-s} = 20 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$ – «корпус – точка пайки».

Для определения теплового сопротивления R оставшихся участков полупроводникового устройства воспользуемся формулой (1), представленной ниже:

$$R = \frac{\delta}{\lambda \cdot S} \quad (1)$$

где δ - толщина материала, через который проходит тепловой поток;

λ - коэффициент теплопроводности материала;

S - поверхность, через которую проходит тепловой поток.

Найдем тепловое сопротивление печатной платы. Стоит отметить, что в данном светильнике применена печатная плата форм фактора Metal Core PCB, состоящая из трех слоев:

- 1) Диэлектрик (100 мкм);
- 2) Медная фольга (35 мкм);
- 3) Алюминиевое основание (2 мм).

Итого, при расчете суммарного теплового сопротивления печатной платы необходимо рассчитать каждый слой и в последующем выполнить сложение результатов:

$$R_{\text{ит}} = R_{\text{диэл}} + R_{\text{меди}} + R_{\text{Al}} \quad (2)$$

Расчет диэлектрического слоя представлен ниже, используя формулу 1:

$$R_{\text{диэл}} = \frac{\delta_{\text{диэл}}}{\lambda_{\text{диэл}} \cdot S_{\text{диэл}}} = \frac{100 \cdot 10^{-6}}{0,24 \cdot 3,14 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot 10^{-3} \right)^2} = 1,6 \text{ }^\circ\text{C} / \text{Вт} \quad (3)$$

Далее произведём расчет теплового сопротивления медной фольги:

$$R_{\text{меди}} = \frac{\delta_{\text{меди}}}{\lambda_{\text{меди}} \cdot S_{\text{меди}}} = \frac{35 \cdot 10^{-6}}{390 \cdot (1 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 10^{-3})} = 0,007 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{Вт} \quad (4)$$

Следующим этапом является расчет теплового сопротивления алюминиевого слоя:

$$R_{\text{Al}} = \frac{\delta_{\text{Al}}}{\lambda_{\text{Al}} \cdot S_{\text{Al}}} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{210 \cdot 3,14 \cdot (1 \cdot 10^{-3})^2} = 0,037 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{Вт} \quad (5)$$

Считаем суммарное сопротивление по формуле 2:

$$R_{\text{мн}} = 1,6 + 0,007 + 0,037 = 1,644 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{Вт} \quad (6)$$

Для выполнения расчета теплового сопротивления $R_{\text{рад}}$ необходимо условно разделить теплоотводящий радиатор на две части $R_{\text{рад1}}$ и $R_{\text{рад2}}$:

$$R_{\text{рад}} = R_{\text{рад1}} + R_{\text{рад2}} \quad (7)$$

Расчет теплового сопротивления первого участка представлен ниже:

$$R_{\text{рад1}} = \frac{\delta_{\text{рад1}}}{\lambda_{\text{рад1}} \cdot S_{\text{рад1}}} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{210 \cdot 3,14 \cdot (1 \cdot 10^{-3})^2} = 0,09 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{Вт} \quad (8)$$

Далее расчет теплового сопротивления второго участка:

$$R_{pad2} = \frac{\delta_{pad2}}{\lambda_{pad2} \cdot S_{pad2}} = \frac{40 \cdot 10^{-3}}{210 \cdot 3,14 \cdot (1 \cdot 10^{-3})^2} = 0,75 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{Вт} \quad (9)$$

Суммарное сопротивление радиатора рассчитаем по формуле 7:

$$R_{pad} = 0,09 + 0,75 = 0,84 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{Вт} \quad (10)$$

Итоговым действием в подсчете общего теплового сопротивления светодиодного светильника является алгебраическая сумма всех ранее известных:

$$R_{\Sigma} = R_{th-j} + R_{th-s} + R_{mn} + R_{pad} = 6 + 20 + 1,644 + 0,84 = 28,484 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{Вт} \quad (11)$$

Для вычисления температура $p-n$ перехода воспользуемся формулой 12, представленной ниже:

$$t_{p-n} = t_a + R_{\Sigma} \cdot P \quad (12)$$

где t_a - температура окружающей среды;

R_{Σ} - суммарное тепловое сопротивление «кристалл – окружающая среда»;

P - мощность одного светодиода.

Для расчета температуры кристалла необходимо задаться температурой окружающей среды. Условимся, что температура окружающей среды равна «+22°C». Подставим известные значения в формулу 12 и получим:

$$t_{p-n} = 22 + 28,5 \cdot 0,5 = 36,25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (13)$$

Для сравнения и анализа с последующими методами определения температуры кристалла необходимо рассчитать также температуру в точке пайке светодиода. В таком исключаем из R_{Σ} тепловые сопротивления R_{nn} и $R_{рад}$. Таким образом суммарное тепловое сопротивление станет равно:

$$R_{\Sigma 2} = R_{th-j} + R_{th-s} = 6 + 20 = 26 \text{ }^{\circ}\text{C} / \text{Вт} \quad (14)$$

Таким образом, температура в точке пайке t_s получится:

$$t_s = t_a + R_{\Sigma 2} \cdot P = 22 + 26 \cdot 0,5 = 35 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (15)$$

2.2 Экспериментальное исследование температуры нагрева единичного светодиода

Следующим этапом является проведение натурального эксперимента. Для проведения эксперимента было использовано тепловизионное оборудование. Предварительно произведем замер температуры окружающего воздуха этим же прибором. Она составила +22 °С. Подача питания единичного светодиода осуществлялось от постороннего источника, так как в данном устройстве отсутствует пуск – регулирующая аппаратура. Также необходимо отметить, что замер необходимо делать после того, как измеряемое световое устройство поработает некоторое время для достижения своей рабочей температуры. Результаты измерений представлены на рисунках ниже:

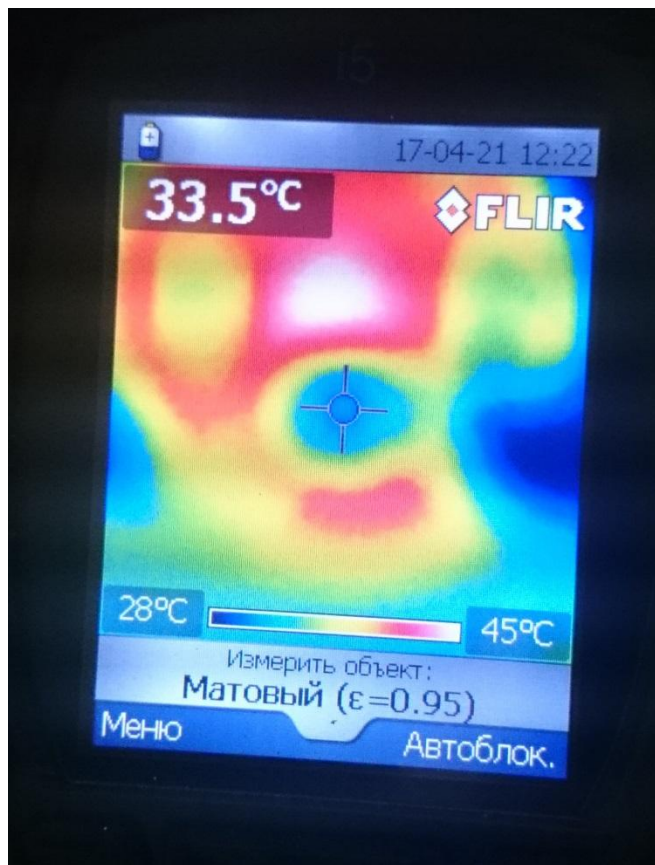


Рисунок 23 – Температура в условной точке пайки светодиода

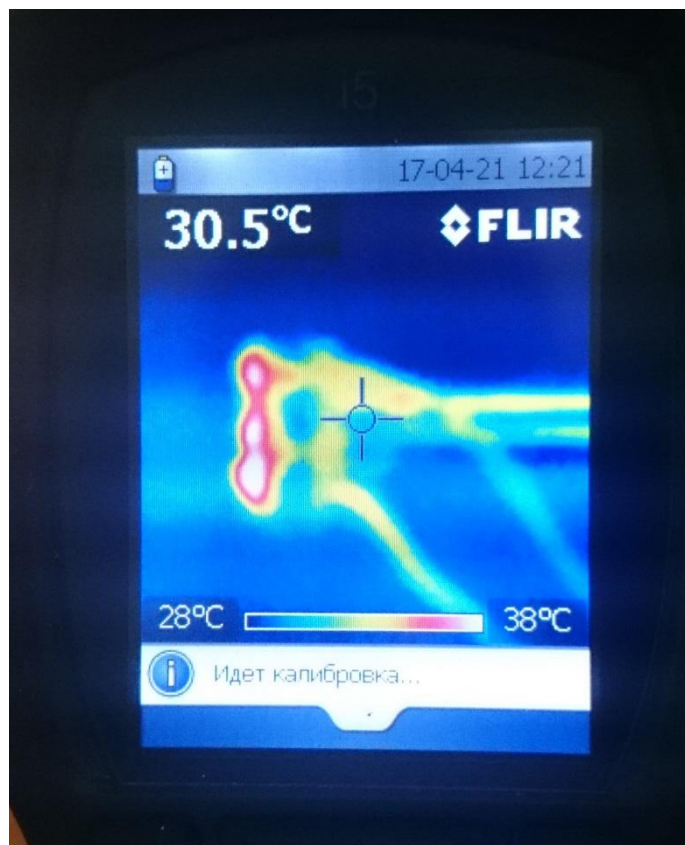


Рисунок 24 – Температура ближайшей части охладителя к светодиоду

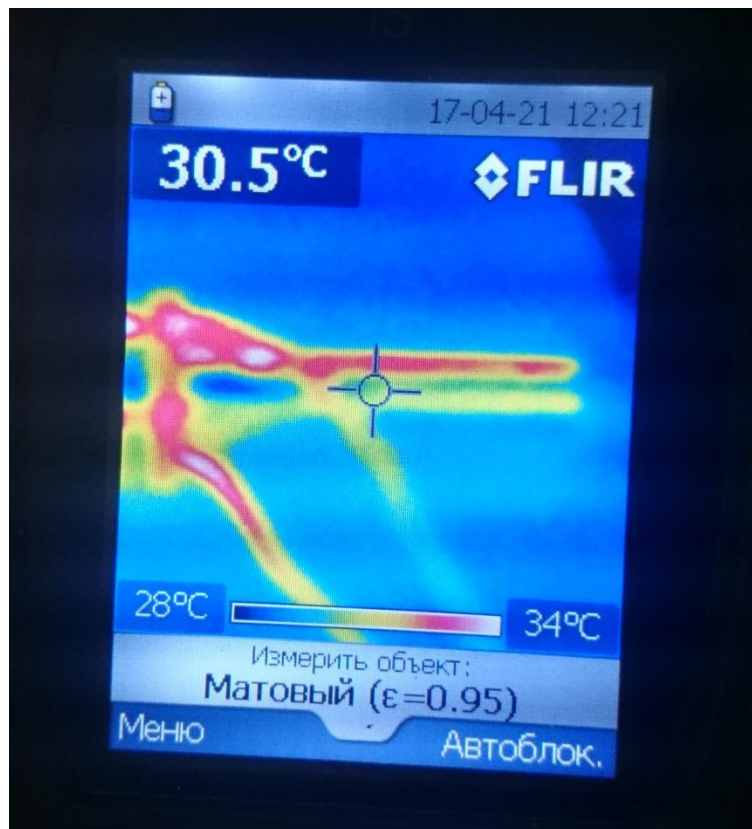


Рисунок 25 – Температура в средней части охладителя



Рисунок 26 – Температура в конечной точке охладителя

2.3 Компьютерное моделирование тепловых процессов протекающих в единичном светодиоде в программной среде Solidworks Simulation.

Хотелось бы отметить преимущество моделирования протекающих процессов в специализированных программах. Это позволяет изучить и предотвратить ошибки на этапе проектировании устройства без изготовления опытных образцов, что существенно сокращает затраты фирмы – производителя.

Исходные данные были заданы в начальные условия и параметры исследуемой геометрической модели в специальной области программного продукта, представленной на рисунке 27.

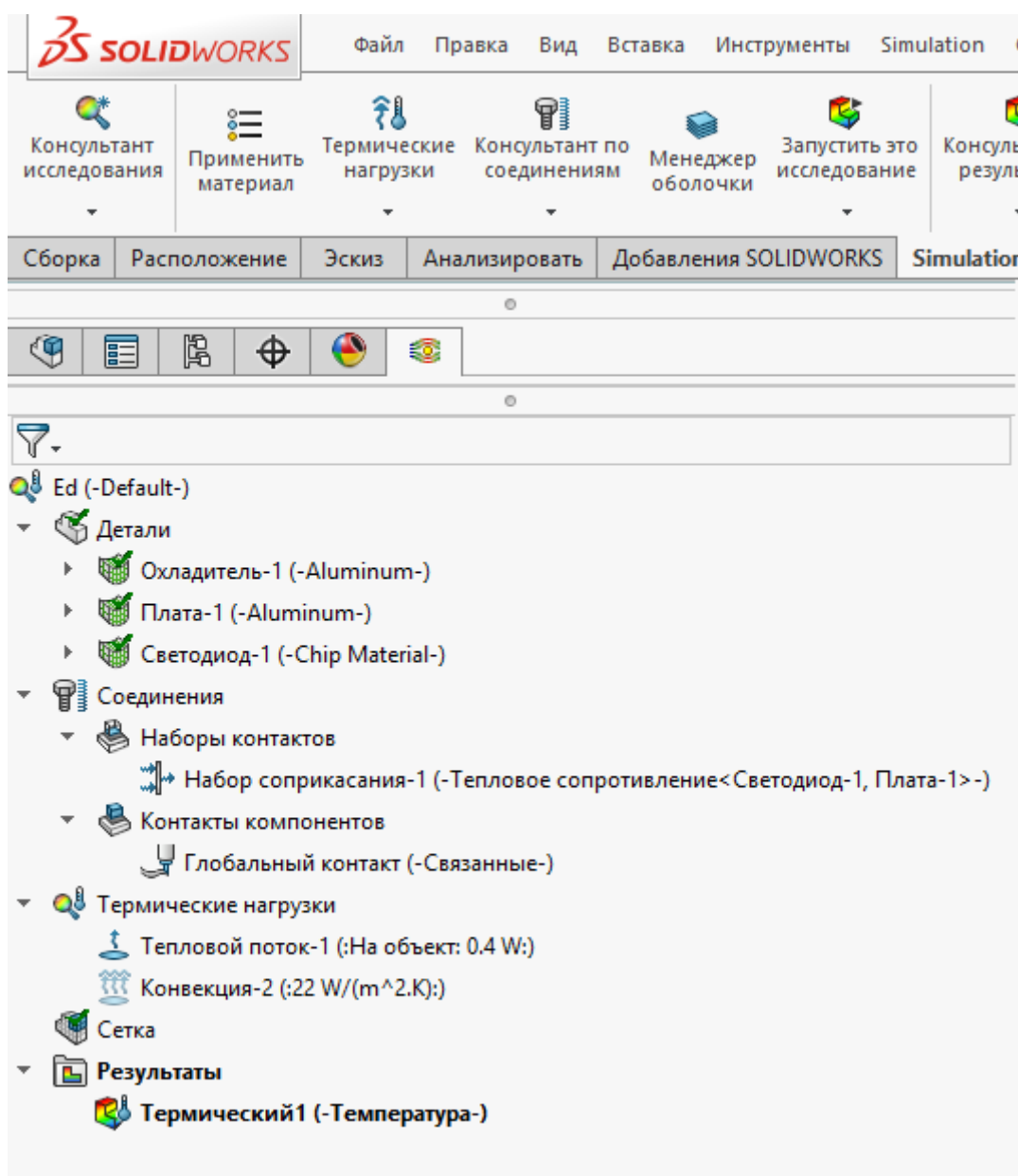


Рисунок 28 – Исходные данные и начальные условия

В разделе «Детали» каждой спроектированной детали задается материал. В свойствах материала для теплового расчета обязательным условием является указание следующих параметров, указанных ниже:

- а) массовая плотность;
- б) теплопроводность;
- в) удельная теплоемкость.

Пример задания параметров алюминия показан на рисунке 29.

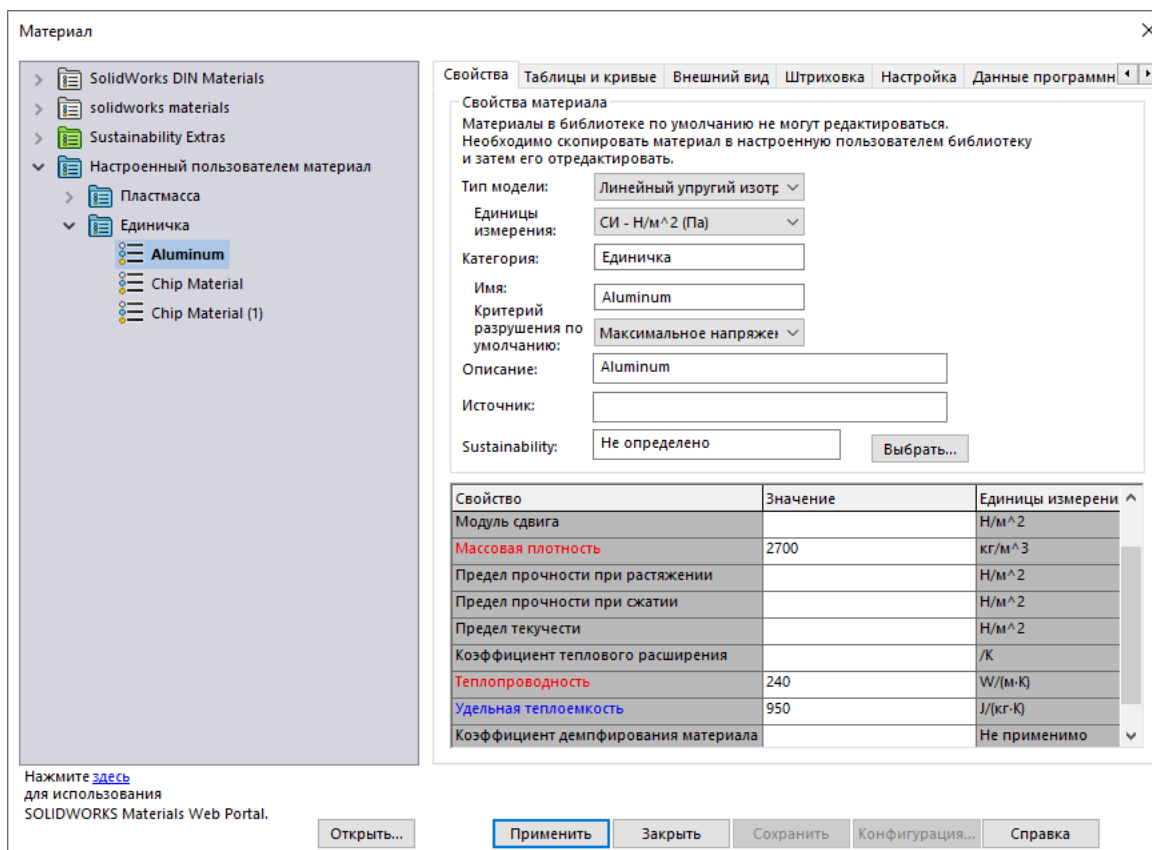


Рисунок 29 – Пример задания параметров алюминия

В разделе «Соединения» указывается связь деталей между собой с указанием теплового сопротивления.

В разделе «Термические нагрузки» задается тепловая мощность выделяемая светодиодом, а также конвективная теплоотдача. Значение теплоотдачи для гладкой поверхности алюминия по справочным данным составляет $22 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$. Внутри подменю этого же параметра задается и температура окружающей среды.

В разделе «Сетка» математическая модель делится на части для проведения расчетов программой системой уравнений для решения главного уравнения.

В разделе «Результаты» происходит анализ решенной термической задачи, способом построения термических эпюр, зондирования и других.

После задания всех необходимых параметров произведен термический расчет, результаты которого представлены ниже.

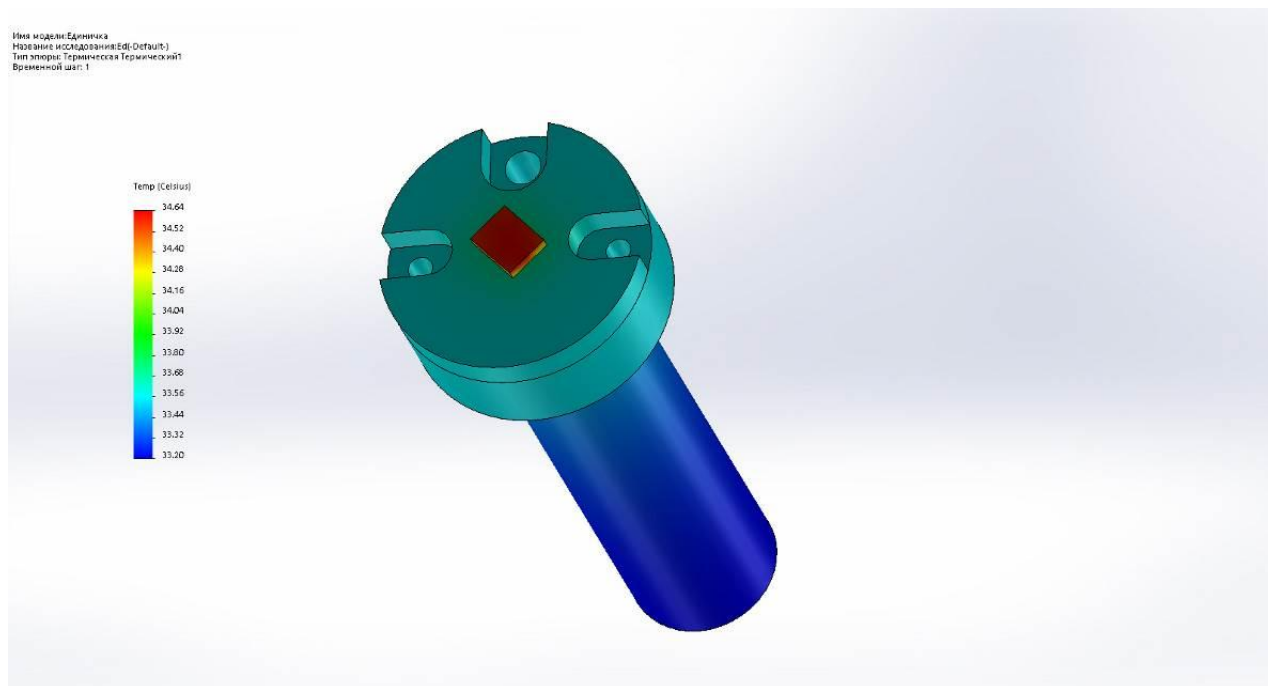


Рисунок 30 – Результаты компьютерного моделирования

Для более детального рассмотрения температуры единичного светодиода была построена термическая эпюра, показывающая распределение температуры в светоизлучающем устройстве.

Также для определения температуры была проведена операция «зондирование» для определения температуры в конкретных точках устройства.

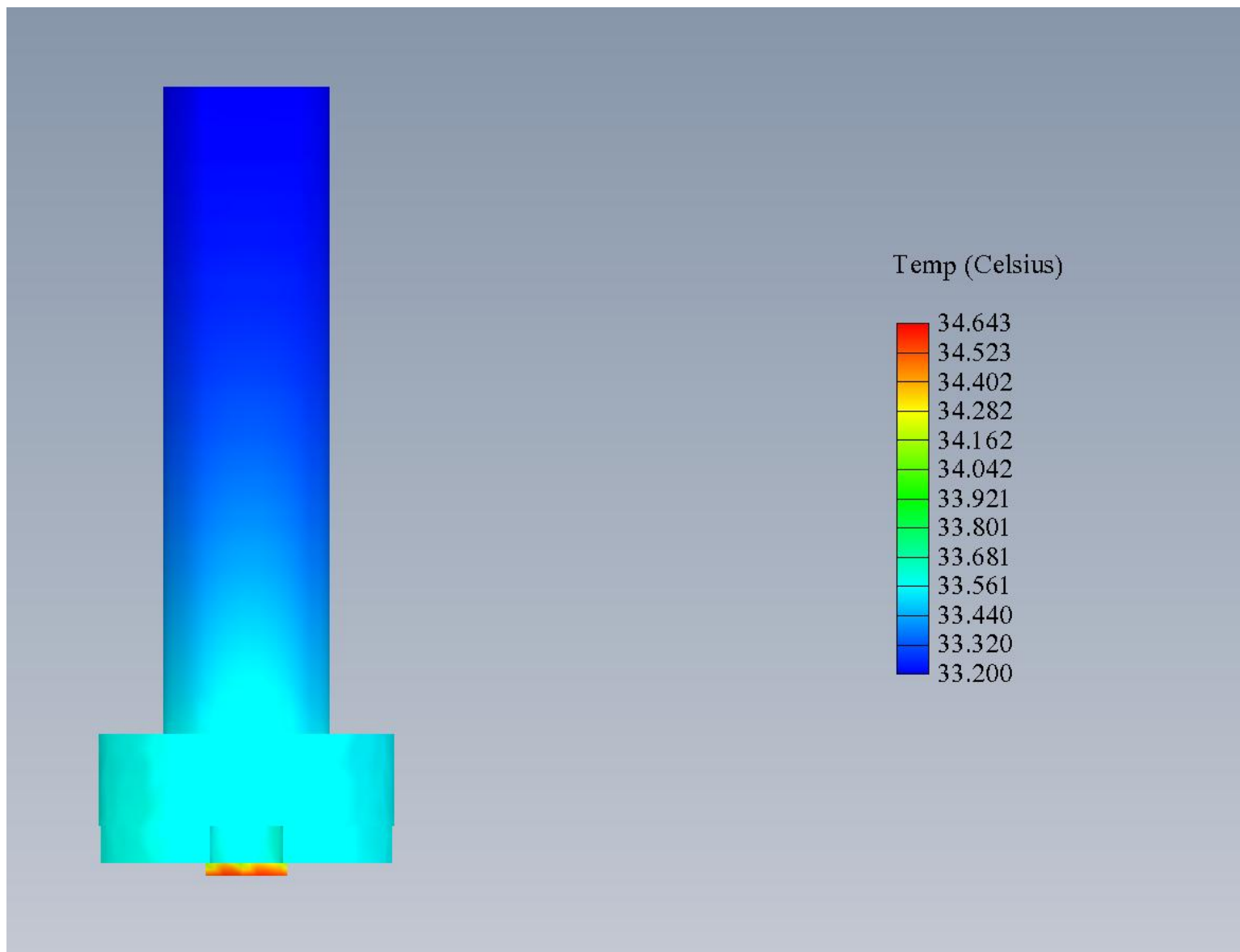


Рисунок 31 – Термическая эпюра распределения тепла светоизлучающего прибора

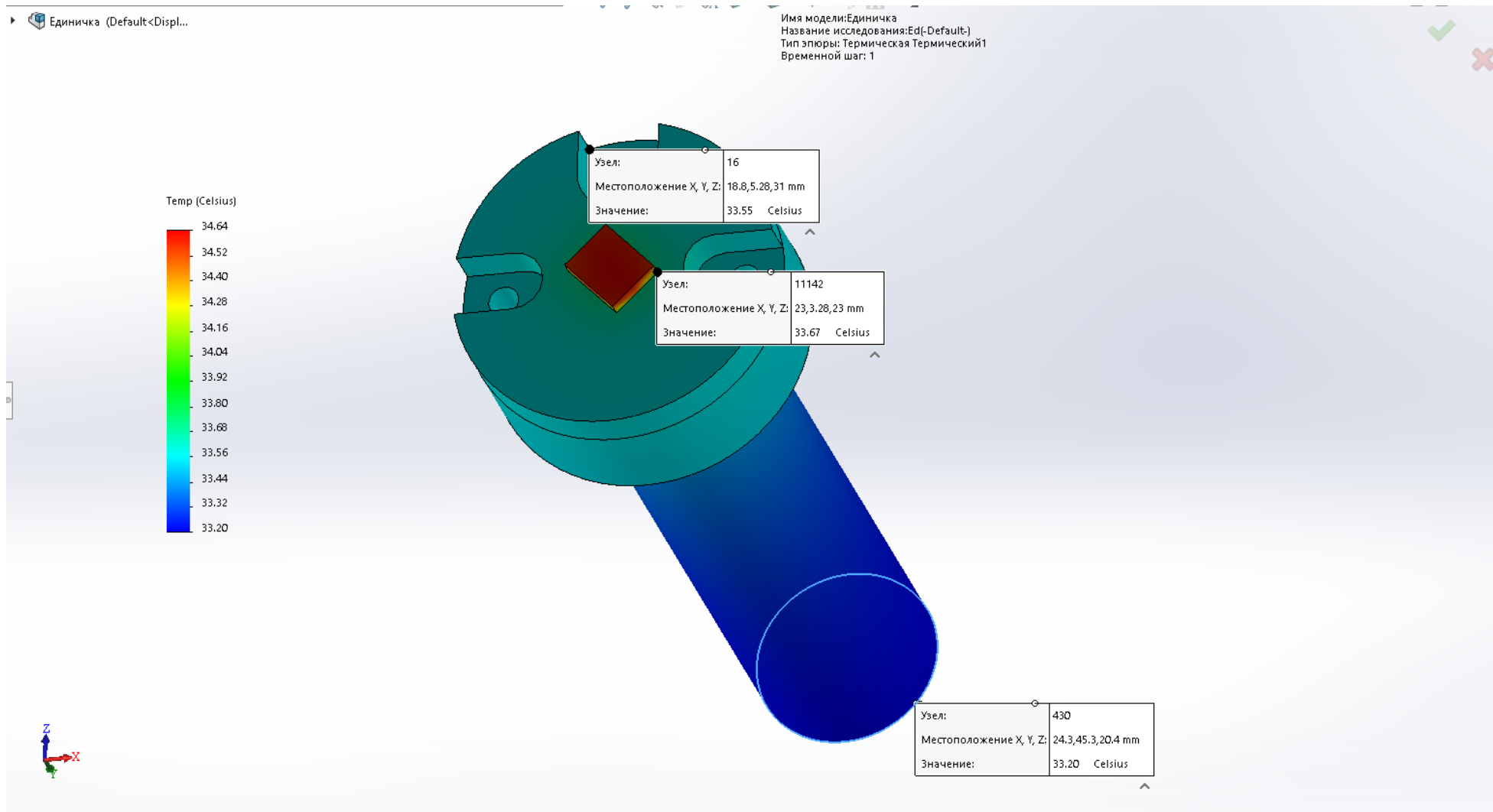


Рисунок 32 – Результат «зондирования»

Название исследования: Ed(-Default)
Тип эюры: Термическая Термический1
Временной шаг: 1

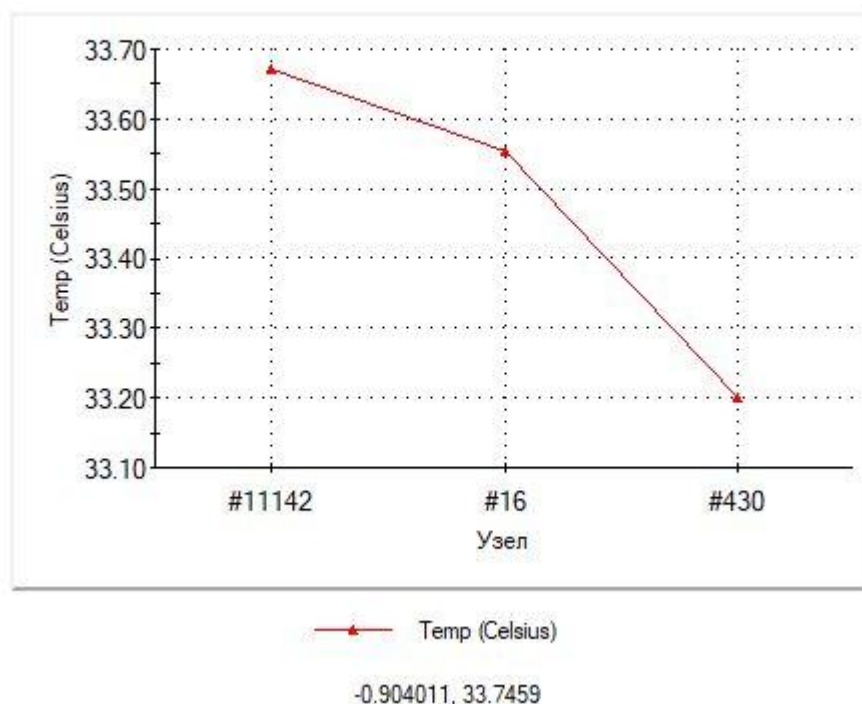


Рисунок 33 – График температуры устройства

Верхняя точка графика соответствует точке на рисунке 33 в условной точке пайки светодиода.

Средняя точка графика соответствует температуре в точке между платой и охладителем из рисунка 33.

Нижняя точка графика соответствует температуре в самой дальней точке охладителя от светодиода из рисунка 33.

2.4 Анализ движения теплового потока «бобышки»

Движения теплового потока, необходимого для анализа запирания воздуха, что препятствует эффективному охлаждению, проанализировано математическим моделированием протекающих процессов в программном продукте Solidworks Flow Simulation. Результаты моделирования представлены на рисунке 34.

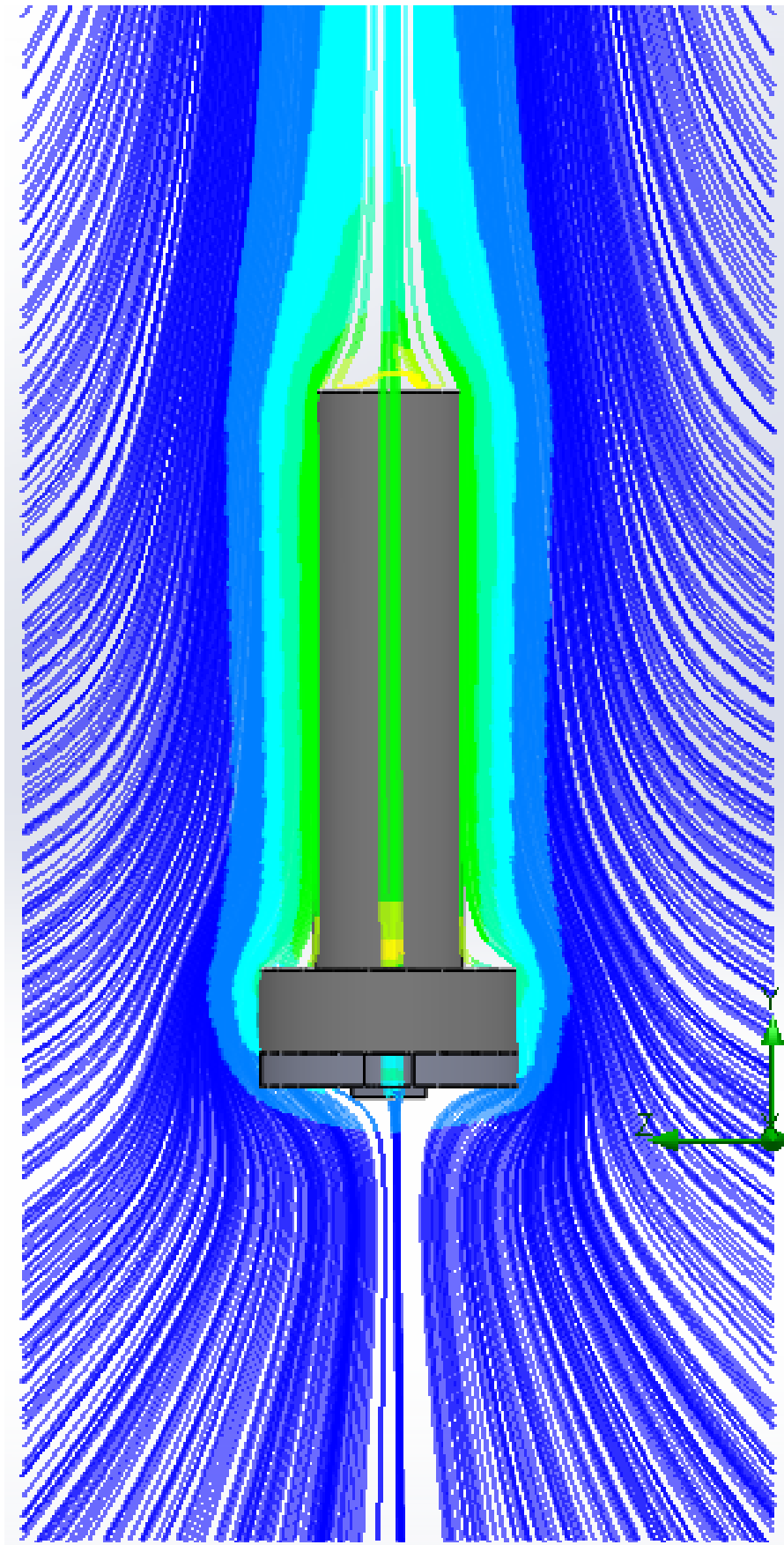


Рисунок 34 – Движение теплового потока единичного светодиода

2.5 Выводы по главе 2

1. Анализируя проделанную работу, можно сделать вывод, что результаты расчета, измерения и моделирования имеют разницу в 1-2 градуса по Цельсию, что говорит о правильности проведенного моделирования.
2. Стоит отметить затраченное время на выполнения проделанной работы по отдельным пунктам исследования. Конечно, метод измерения тепловизером является лидером, но стоит отметить, что для проведения замера необходимо изготовление опытного образца светодиодного устройства, что в свою очередь несет дополнительные финансовые расходы.
3. В сравнении формульного метода и компьютерного моделирования сделан вывод, что затраченное время моделирования вдвое меньше времени, затраченного на расчет.
4. Следующий этап это проведение теплового расчета непосредственно светодиодного светильника.

3 Тепловой расчет светодиодного светильника

3.1 Описание технических параметров светодиодного светильника, выбранного для исследования

Для проведения исследования теплового режима электронного устройства был выбран промышленный светодиодный светильник «Титан», мощностью 55Вт.

Внешний вид устройства представлен на рисунках ниже.



Рисунок 35 – Изометрический вид



Рисунок 36 – Вид со стороны плат

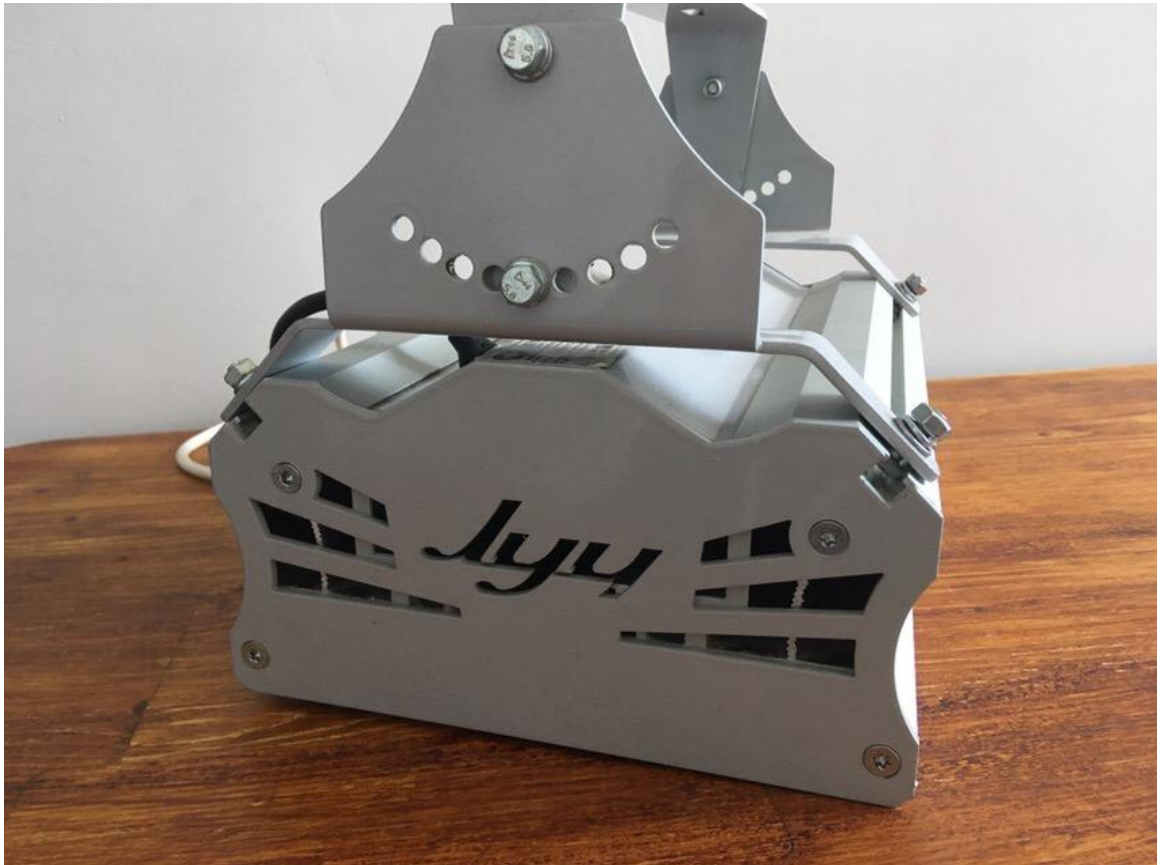


Рисунок 37 – Вид с торца

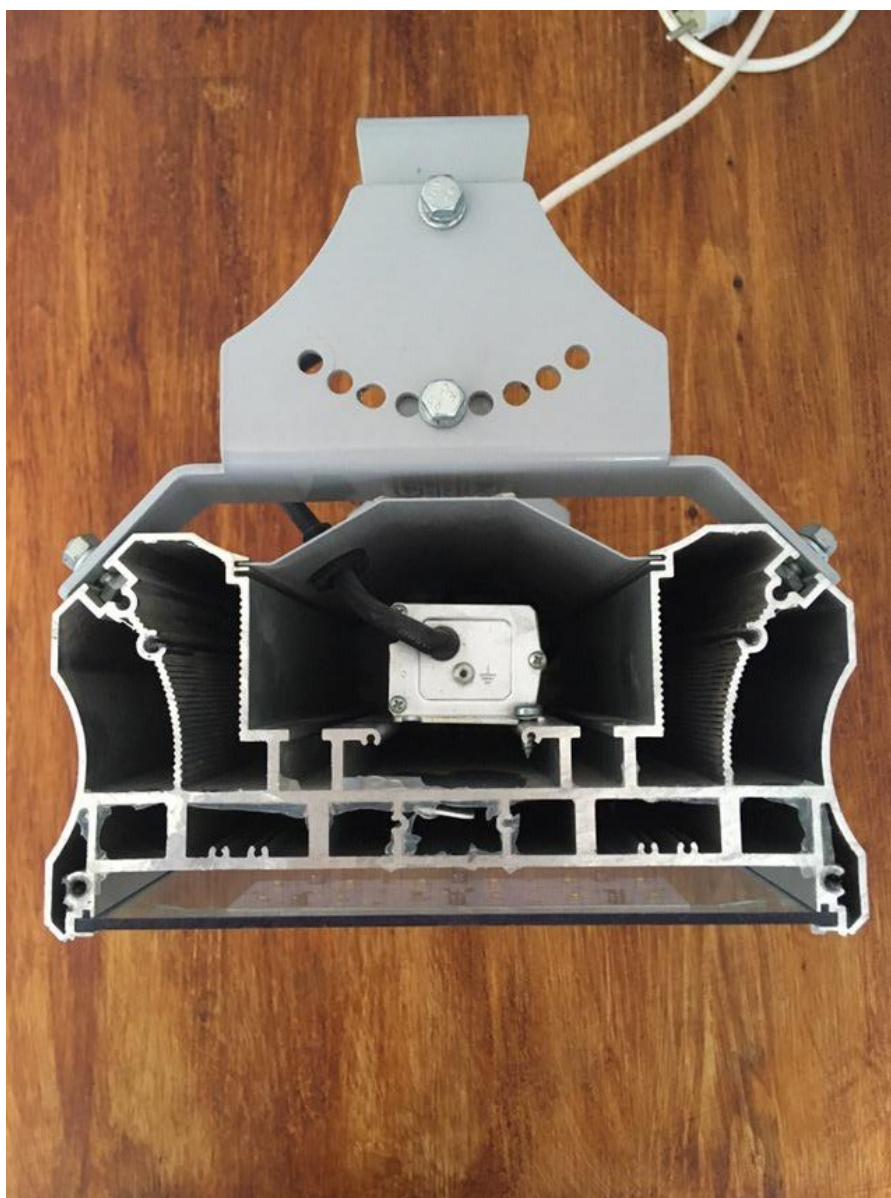


Рисунок 38 – Вид с торца с открытой крышкой

Корпус данного светильника выполнен из анодированного алюминия. Материал кронштейна – сталь марки ПС.

Светильник имеет мощность 55 Вт, которые распределены на две платы типа *MC-PCB* (основа – алюминий). На каждой из двух линеек по 12 светодиодов, размерами 3,5 x 3,5 мм. Также светильник имеет защитное экран, закрывающий уязвимую часть светильника – светодиодные платы. Материал экрана – прозрачный поликарбонат. Стоит отметить, что светильник предназначен для уличного и промышленного освещения и имеет для таких условий защиты от влаги и пыли IP 65. Технические характеристики представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики выбранного светодиодного светильника

Напряжение питания	176-264 В (45-65Гц) АС
Потребляемая мощность	55 Вт
Марка светодиодов	LG
Световой поток	7400 Лм
Угол излучения и тип КСС	120°(Д)
Цветовая температура	5000 К
Степень защиты от влаги и пыли	IP 65
Вид климатического исполнения	УХЛ 1
Диапазон рабочих температур	-60°С до +50°С
Материал корпуса	Анодированный алюминий
Материал и тип рассеивателя	Поликарбонат (прозрачный)
Масса	2,8 кг

3.2 Составление тепловой схемы замещения и тепловой расчет единичного светодиода формульным методом

Также как и при расчете единичного светодиода, необходимостью является составление тепловой схемы замещения. Схема для светодиодного светильника, корпус которого одновременно является и охладителем для светодиодов представлена на рисунке 39.

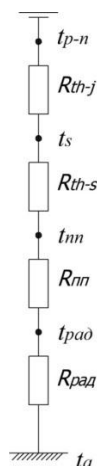


Рисунок 39 – Тепловая схема замещения светодиодного светильника

Исследуемый светодиод произведен компанией LG. Из DataSheet [2] на светодиод LG форм фактора 35x35мм, установленный на данном устройстве, известно тепловое сопротивление $R_{th-j} = 6 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$ – «кристалл – корпус», а также тепловое сопротивление $R_{th-s} = 12 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$ – «корпус – точка пайки».

Для определения теплового сопротивления R оставшихся участков полупроводникового устройства воспользуемся формулой (1).

Найдем тепловое сопротивление печатной платы. Стоит отметить, что в данном светильнике применена печатная плата форм фактора Metal Core PCB, состоящая из трех слоев:

- 4) Диэлектрик (100 мкм);
- 5) Медная фольга (35 мкм);
- 6) Алюминиевое основание (2 мм).

Итого, при расчете суммарного теплового сопротивления печатной платы необходимо рассчитать каждый слой и в последующем выполнить сложение результатов.

Расчет диэлектрического слоя представлен ниже, используя формулу 1:

$$R_{\text{диэл}(1)} = \frac{\delta_{\text{диэл}(1)}}{\lambda_{\text{диэл}(1)} \cdot S_{\text{диэл}(1)}} = \frac{100 \cdot 10^{-6}}{0,24 \cdot (3,5 \cdot 10^{-3} \cdot 145 \cdot 10^{-3})} = 0,07 \text{ }^\circ\text{C} / \text{Вт} \quad (16)$$

Стоит обратить внимание, что получившийся выше результат соответствует лишь тепловому сопротивлению для одной платы, а в нашем светодиодном светильнике их две. Расчет для двух плат производится по аналогии с параллельным соединением элементов сопротивлений (формула 17).

$$R_{\text{диэл}} = \frac{R_{\text{диэл}(1)} \cdot R_{\text{диэл}(1)}}{R_{\text{диэл}(1)} + R_{\text{диэл}(1)}} = \frac{0,07 \cdot 0,07}{0,07 + 0,07} = 0,035 \text{ }^\circ\text{C} / \text{Вт} \quad (17)$$

Далее произведём расчет теплового сопротивления медной фольги:

$$R_{\text{меди}(1)} = \frac{\delta_{\text{меди}(1)}}{\lambda_{\text{меди}(1)} \cdot S_{\text{меди}(1)}} = \frac{35 \cdot 10^{-6}}{390 \cdot (3,5 \cdot 10^{-3} \cdot 145 \cdot 10^{-3})} = 15 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C} / \text{Bm} \quad (18)$$

Так же, как и для теплового сопротивления диэлектрического слоя необходимо посчитать тепловое сопротивление и для медной фольги:

$$R_{\text{меди}} = \frac{R_{\text{меди}(1)} \cdot R_{\text{меди}(1)}}{R_{\text{меди}(1)} + R_{\text{меди}(1)}} = \frac{(15 \cdot 10^{-6}) \cdot (15 \cdot 10^{-6})}{(15 \cdot 10^{-6}) + (15 \cdot 10^{-6})} = 7,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C} / \text{Bm} \quad (19)$$

Следующим этапом является расчет теплового сопротивления алюминиевого слоя:

$$R_{\text{Al}(1)} = \frac{\delta_{\text{Al}(1)}}{\lambda_{\text{Al}(1)} \cdot S_{\text{Al}(1)}} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{210 \cdot (3,5 \cdot 10^{-3} \cdot 145 \cdot 10^{-3})} = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C} / \text{Bm} \quad (20)$$

Так же, как и для предыдущих двух случаев считаем тепловое сопротивление для двух плат:

$$R_{\text{Al}} = \frac{R_{\text{Al}(1)} \cdot R_{\text{Al}(1)}}{R_{\text{Al}(1)} + R_{\text{Al}(1)}} = \frac{(6 \cdot 10^{-3}) \cdot (6 \cdot 10^{-3})}{(6 \cdot 10^{-3}) + (6 \cdot 10^{-3})} = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C} / \text{Bm} \quad (21)$$

Считаем суммарное сопротивление по формуле 2:

$$R_{\text{m}} = 0,035 + 7,5 \cdot 10^{-6} + 0,8 \cdot 10^{-3} = 0,036 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{Bm} \quad (22)$$

Для выполнения расчета теплового сопротивления R_{pad} необходимо условно разделить теплоотводящий радиатор на две части R_{pad1} и R_{pad2} :

$$R_{pad} = R_{pad1} + R_{pad2} \quad (23)$$

Расчет теплового сопротивления первого участка представлен ниже:

$$\begin{aligned} R_{pad1} &= \frac{\delta_{pad1}}{\lambda_{pad1} \cdot S_{pad1}} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{210 \cdot (70 \cdot 10^{-3} \cdot 210 \cdot 10^{-3})} \\ &= 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C} / \text{Вт} \end{aligned} \quad (24)$$

Далее расчет теплового сопротивления второго участка:

$$\begin{aligned} R_{pad2} &= \frac{\delta_{pad2}}{\lambda_{pad2} \cdot S_{pad2}} = \frac{80 \cdot 10^{-3}}{210 \cdot (70 \cdot 10^{-3} \cdot 45 \cdot 10^{-3})} \\ &= 0,06 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{Вт} \end{aligned} \quad (25)$$

Суммарное сопротивление радиатора рассчитаем по формуле 23:

$$R_{pad} = 0,25 \cdot 10^{-3} + 0,06 = 0,06 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{Вт} \quad (26)$$

Итоговым действием в подсчете общего теплового сопротивления светодиодного светильника является алгебраическая сумма всех ранее известных:

$$R_{\Sigma} = R_{th-j} + R_{th-s} + R_{nm} + R_{pad} = 6 + 12 + 0,036 + 0,06 = 18,1 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{Вт} \quad (27)$$

Для вычисления температура $p-n$ перехода воспользуемся формулой 28, представленной ниже:

$$t_{p-n} = t_a + R_{\Sigma} \cdot P \quad (28)$$

где t_a - температура окружающей среды;

R_{Σ} - суммарное тепловое сопротивление «кристалл – окружающая среда»;

P - мощность одного светодиода.

Для расчета температуры кристалла необходимо задаться температурой окружающей среды. Такой расчет необходим для последующего сравнения методов расчета. Условимся, что температура окружающей среды равна «+22°C». Подставим известные значения в формулу 12 и получим:

$$t_{p-n} = 22 + 18,1 \cdot 2 = 58,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Также для последующего анализа необходим расчет температуры кристалла при температуре окружающего воздуха «+26°C».

$$t_{p-n} = 26 + 18,1 \cdot 2 = 62,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Для сравнения и анализа с последующими методами определения температуры кристалла необходимо рассчитать также температуру в точке пайке светодиода. В таком исключаем из R_{Σ} тепловые сопротивления R_{nn} и R_{pad} . Таким образом суммарное тепловое сопротивление станет равно:

$$R_{\Sigma 2} = R_{th-j} + R_{th-s} = 6 + 12 = 18 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{Вт} \quad (14)$$

Температура в точке пайке t_s получится:

$$t_s = t_a + R_{\Sigma 2} \cdot P = 22 + 18 \cdot 2 = 58 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (15)$$

Максимальная рабочая температура, заданная техническими характеристиками устройства составляет «+50°C». Подставим известные значения и получим:

$$t_{p-n} = 50 + 18,1 \cdot 2 = 86,2 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (29)$$

Таким образом, исходя из температуры кристалла светодиода «85°C», при которой он выдает максимальный световой поток, можно сделать вывод, что в сравнении с полученным расчетным результатом, он имеет не существенные отклонения. Самым важным следствием является также то, что кристалл светодиода прекрасно себя чувствует при такой температуре. Тогда как максимальная допустимая его температура «110°C».

3.3 Экспериментальное исследование температуры нагрева единичного светодиода

3.3.1 Измерение температуры термопарой

Для проведения измерения была использована термопара и мультиметр.

На светодиодной плате некоторые производители указывают место для измерения температуры в точке пайки светодиода. Оно представляет собой луженую площадку, приложив терморегистрирующий прибор к которой терморегистрирующий прибор можно узнать температуру t_s . В данном светильнике имеется такое место и указано оно на рисунке 40 стрелкой с обозначением T_{SP} .

Для возможности обеспечения крепления термопары к точке пайки светильник был разобран. То есть, снята торцевая крышка и сдвинут экран до тех пор, пока не был получен доступ к контактной площадке. После крепления температурного элемента светильник собран в исходное состояние.

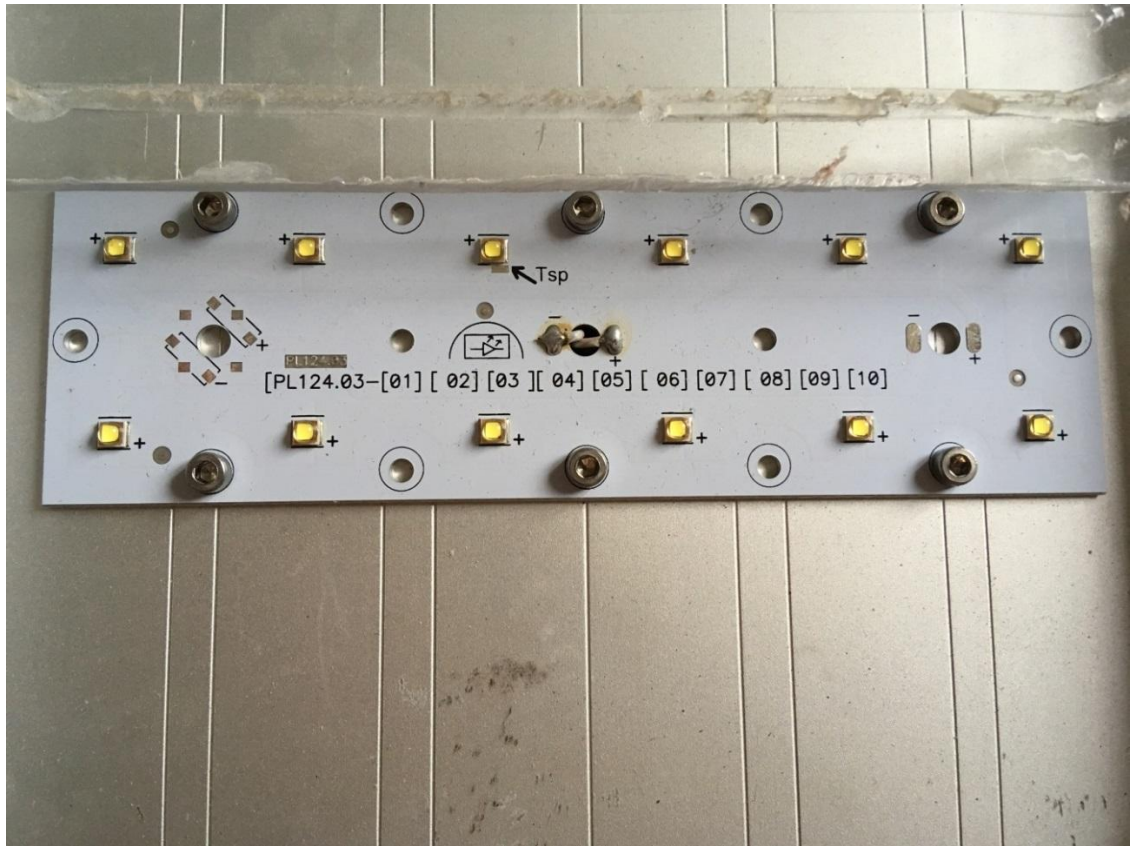


Рисунок 40 Обозначение условной точки пайки

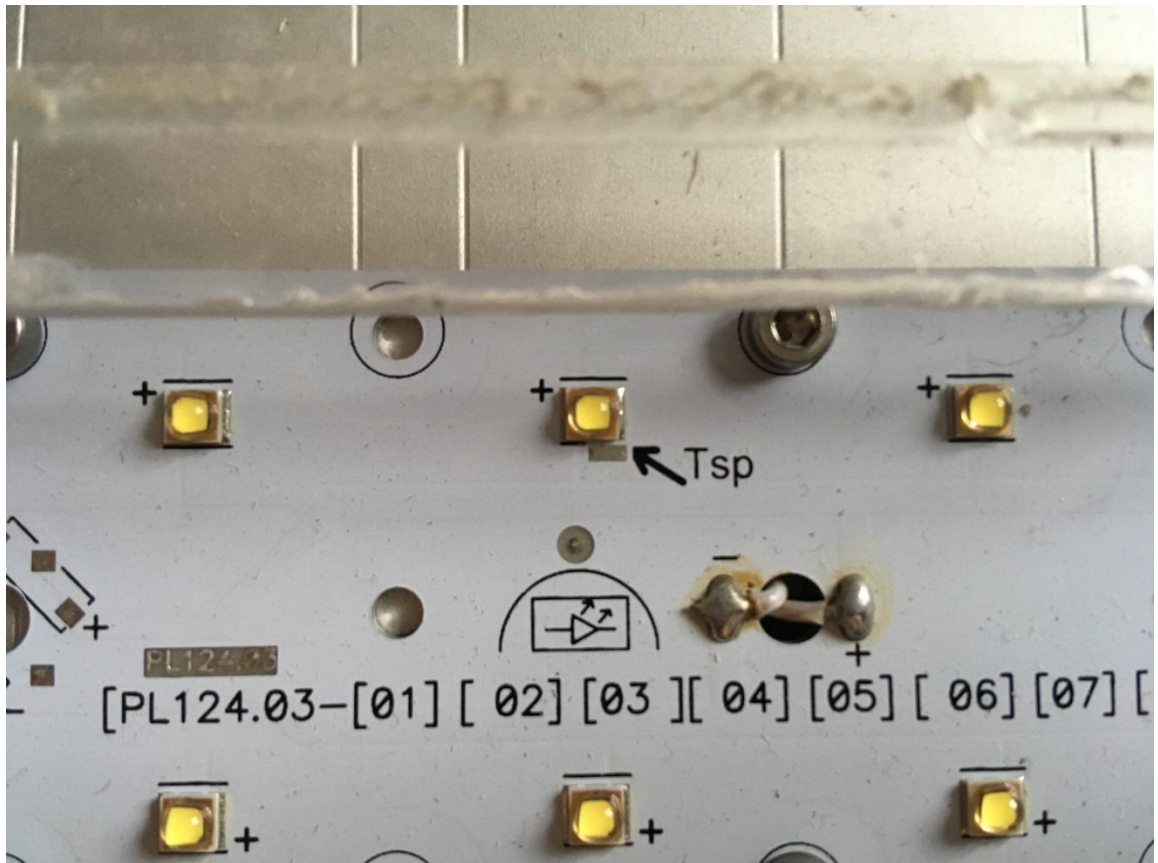


Рисунок 41 – Условная точка пайки T_{SP} в увеличенном виде

Однако при измерении данным методом имеются некоторые неудобства и сложности. Термопару достаточно сложно закрепить в неподвижном состоянии достаточно долго времени. Прибегнув к помощи паяльника, припаять ее достаточно сложно вследствие ее конструктивных свойств. Поэтому для крепления был использован термопистолет. Стоит отметить, что дабы избежать внешних погрешностей измерения необходимо выполнять крепление возле теплоизмеряющей бобышки. Результаты представлены на рисунках ниже.

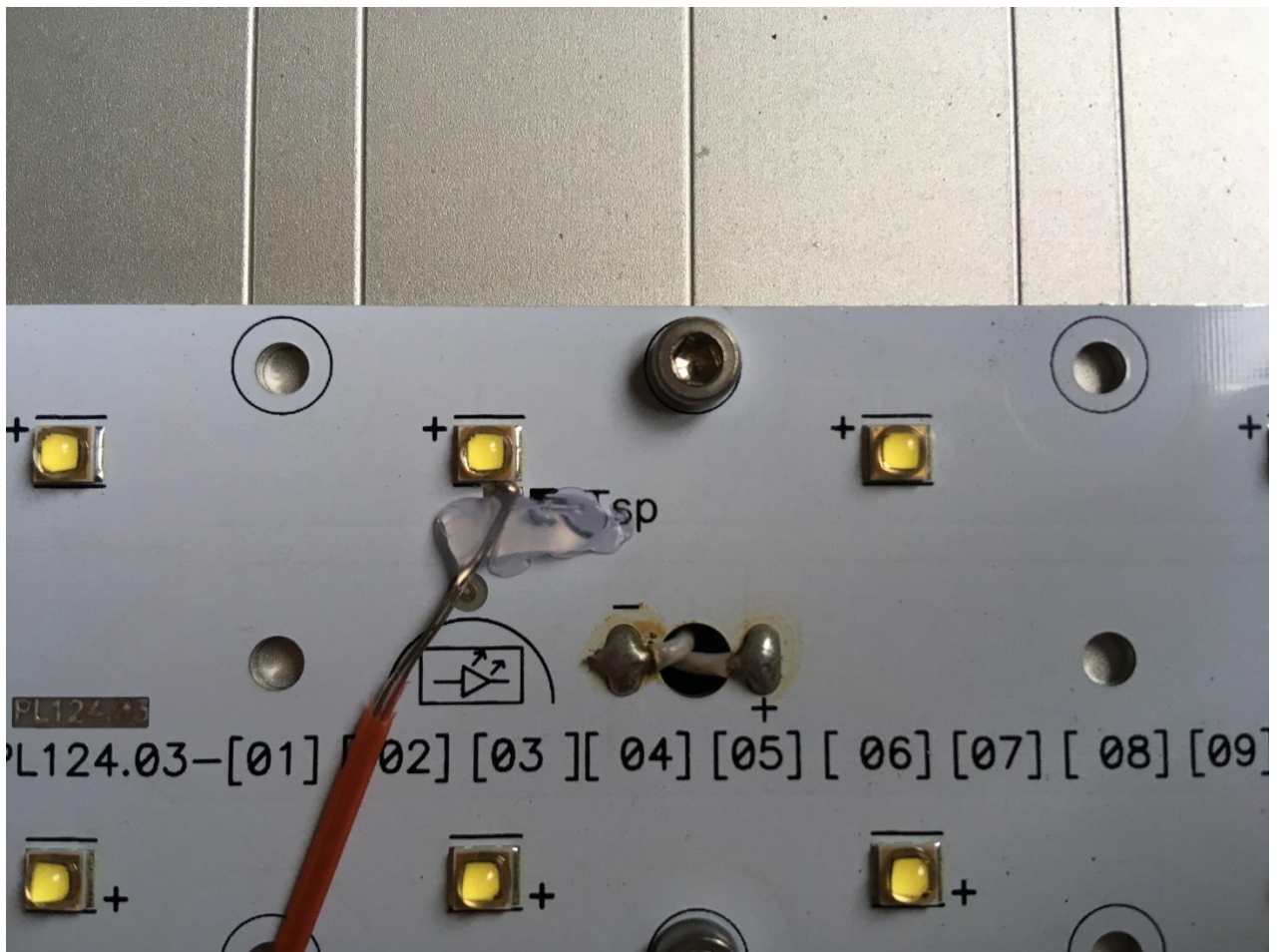


Рисунок 42 – Крепление термопары вид сверху

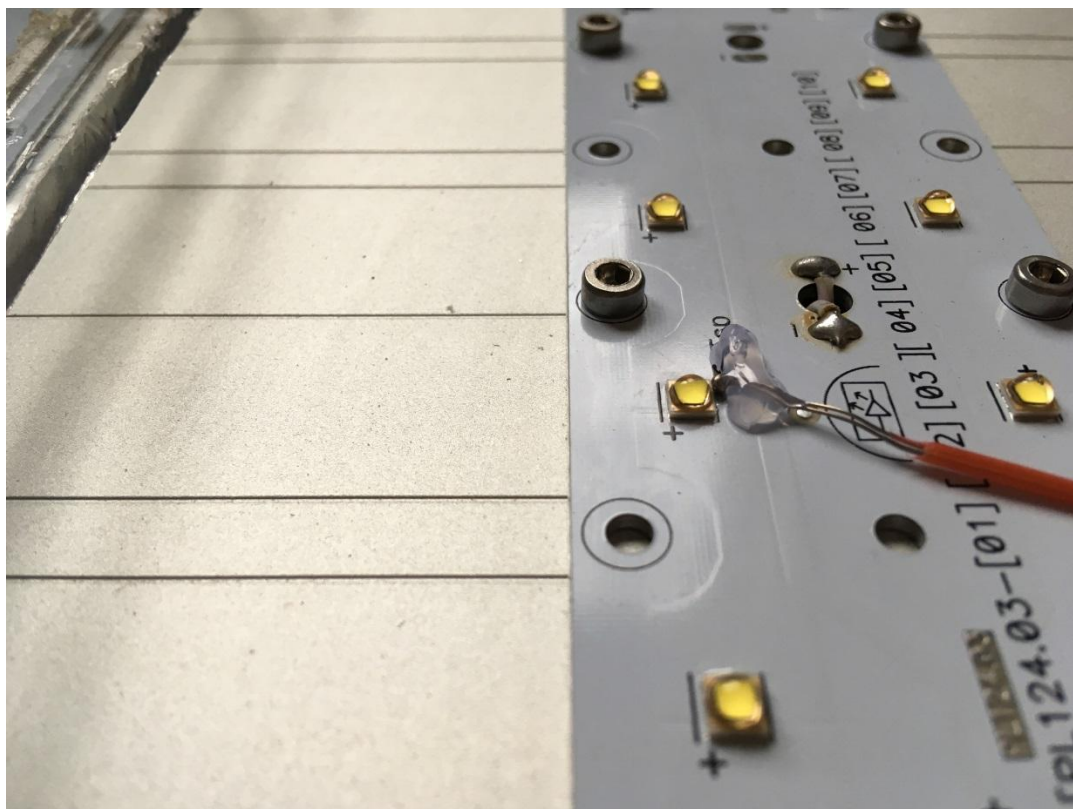


Рисунок 43 – Крепление термопары вид сбоку

Для выполнения естественной среды для измерения светильника была собрана установка естественного подвеса светильника.



Рисунок 44 – Установка для измерения светодиодного светильника

На рисунке 44 по показаниям мультиметра видно значение начальной температуры замера точки пайки. Измерения производились в течение 90 минут с промежуточной фиксацией температуры. Результаты измерения представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты замеров температуры в точке пайки светодиода

t , мин	0	5	10	20	30	40	90
T_{SP} , °C	25	43	46	50	52	54	58

Далее произведем замер температуры корпуса светодиодного светильника. Крепление термопары осуществляем также термопистолетом.



Рисунок 45 – Крепление термопары на корпусе светильника



Рисунок 46 – Увеличенный ракурс крепления термопары на корпусе

После нагрева светодиодного светильника в течение 90 минут до номинальной температуры корпус нагрелся до 41°C.

Таким образом, можно сделать вывод, что в сравнении результата с формульным методом отличие температуры составляет 2 градуса. Тем самым, расчет выполнен достаточно точно.

3.3.2 Измерение температуры тепловизером

Тепловизионные замеры данного светодиодного светильника производились на производственном предприятии, где температура в помещении составляла 26°C.

Светильник имеет подвес примерно в 45 градусов от горизонтальной плоскости. За счет этого поток воздуха под действием закона физики будет лучше поступать в верхнее направление. Тогда как при подвесе светильника в горизонтальном положении движению воздуха будет препятствовать большая площадь светильника.

Результаты замера представлены на следующих изображениях:

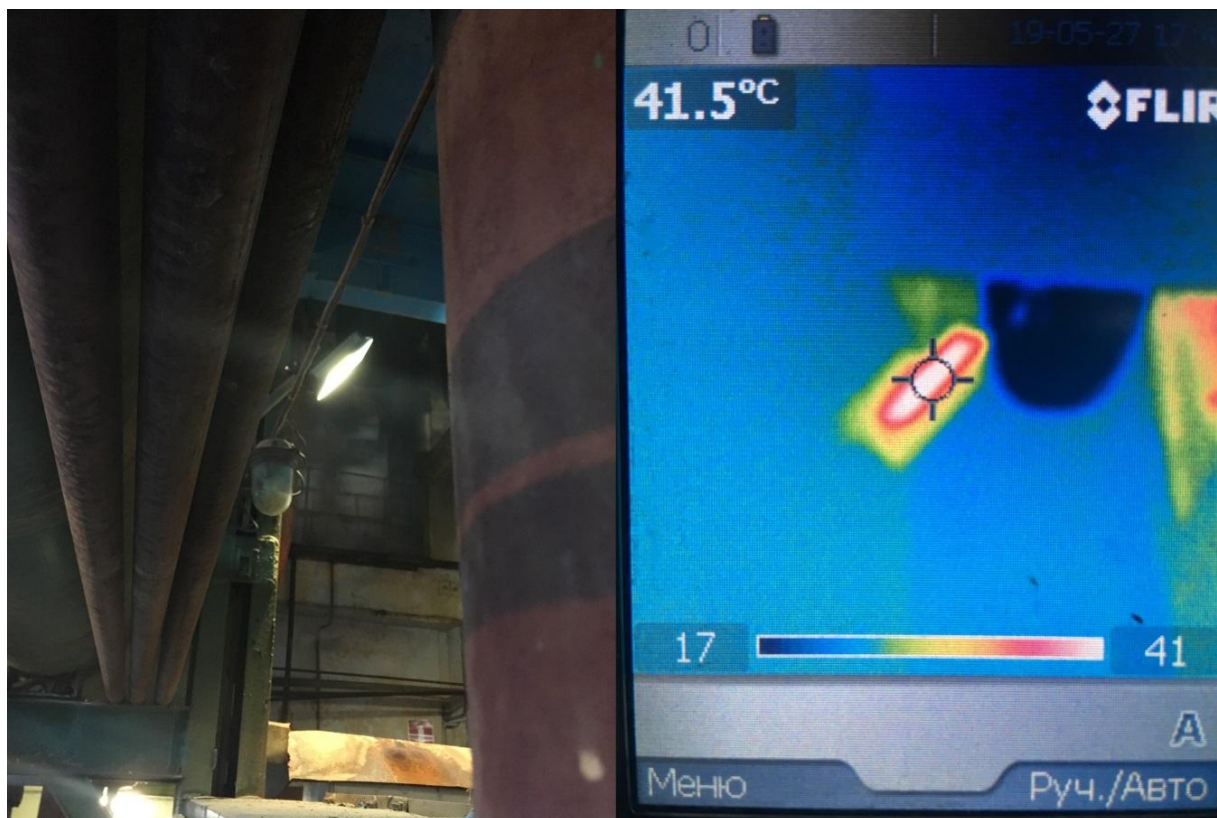


Рисунок 47 – Замер температуры корпуса тепловизором

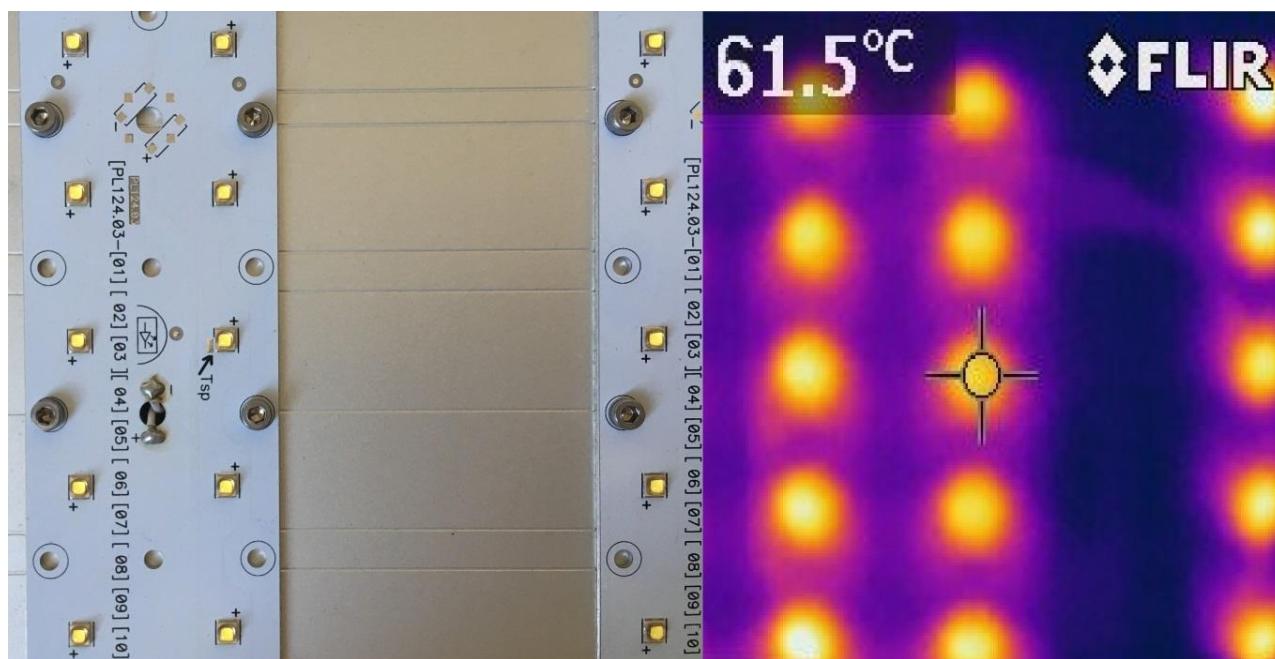


Рисунок 48 – Замер температуры кристалла светодиода

3.4 Компьютерное моделирование тепловых процессов, протекающих в светильнике

Прежде чем, приступить к тепловому исследованию, необходимо создать 3D модель. Создание 3D модели происходит так же в SolidWorks.

Для проведения теплового моделирования 3D модель может быть создана более упрощенной, нежели в реальности. На искажение результатов расчетов упрощение не влияет. При использовании упрощенной модели значительно сокращается время расчета программой. Еще одной сложностью в моделирование более детализованных конструкций это ограничение по вычислительной мощности компьютерной техники. Поэтому при создании можно пренебречь скруглениями, отверстиями для крепления и т.п.

Созданная 3D модель исследуемого светодиодного светильника «Титан» мощностью 55Вт представлена на изображениях ниже.

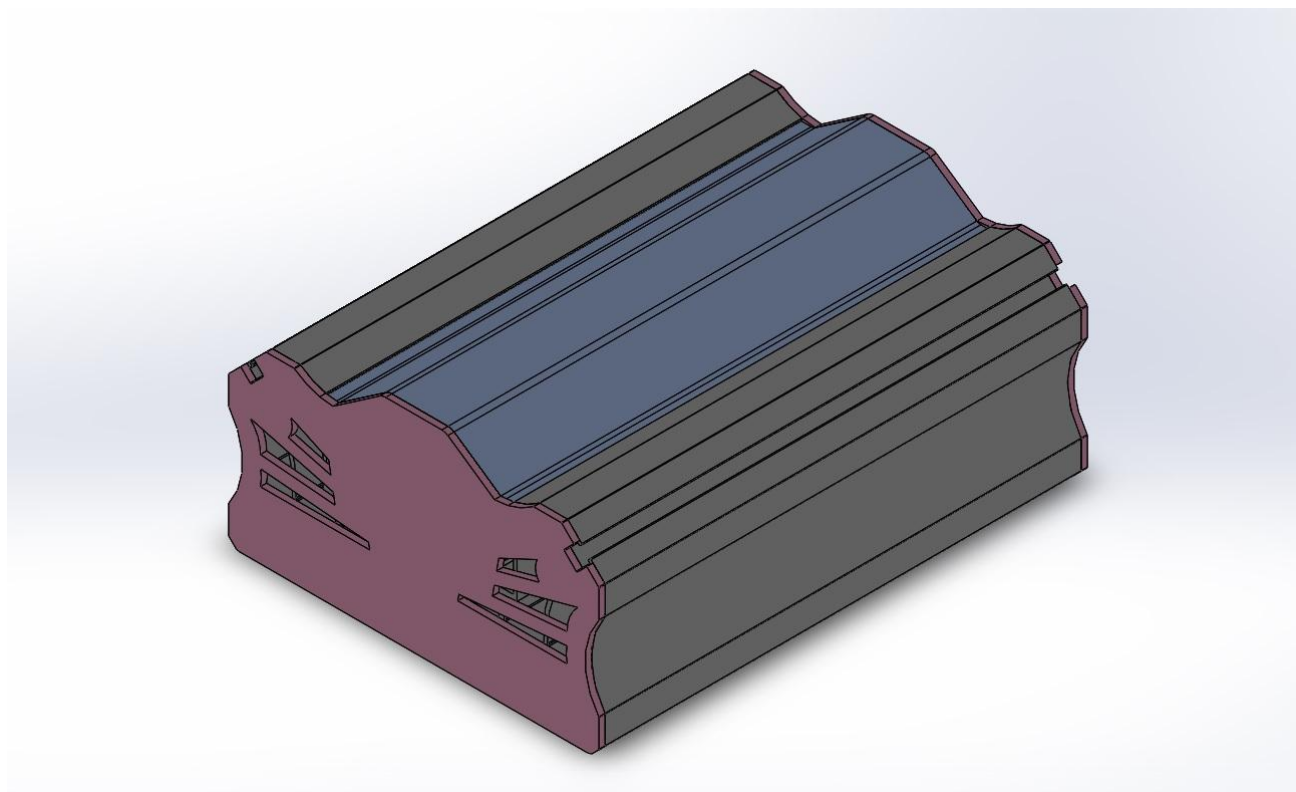


Рисунок 49 – Изомерический вид 3D модели исследуемого светодиодного светильника

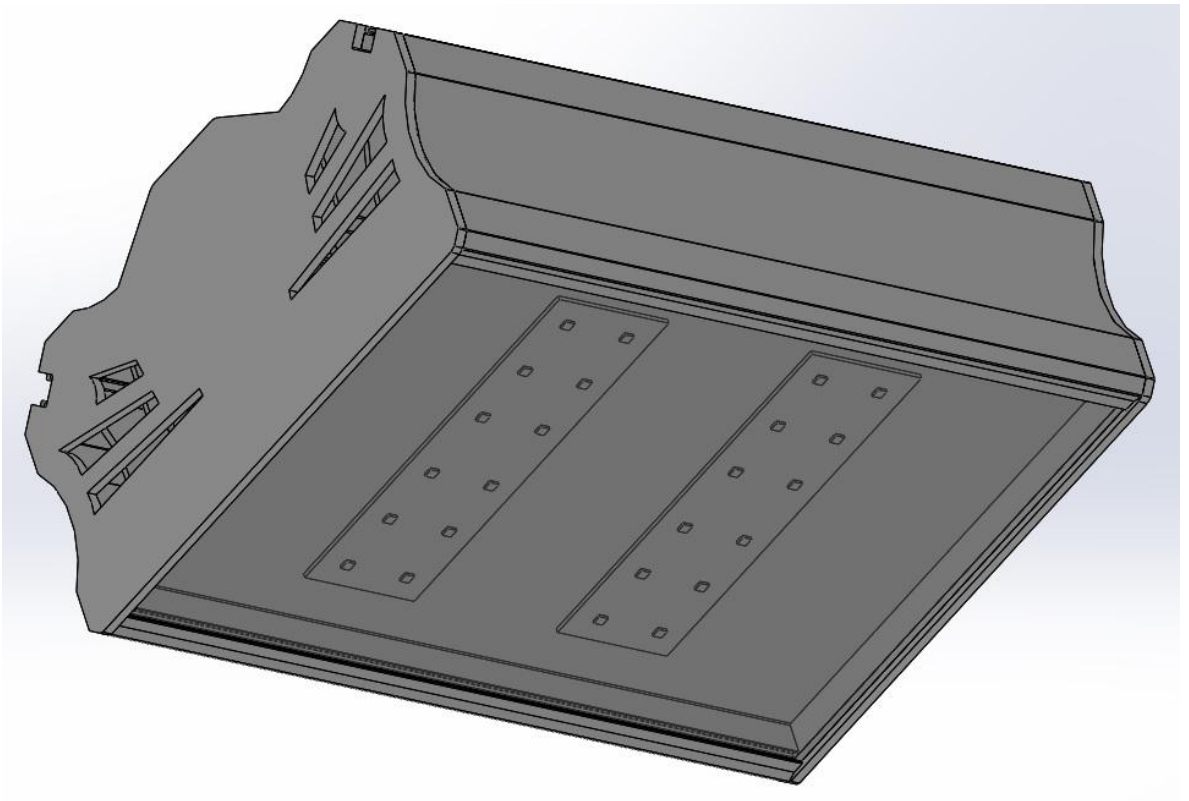


Рисунок 50 – Внешний вид 3D модели снизу

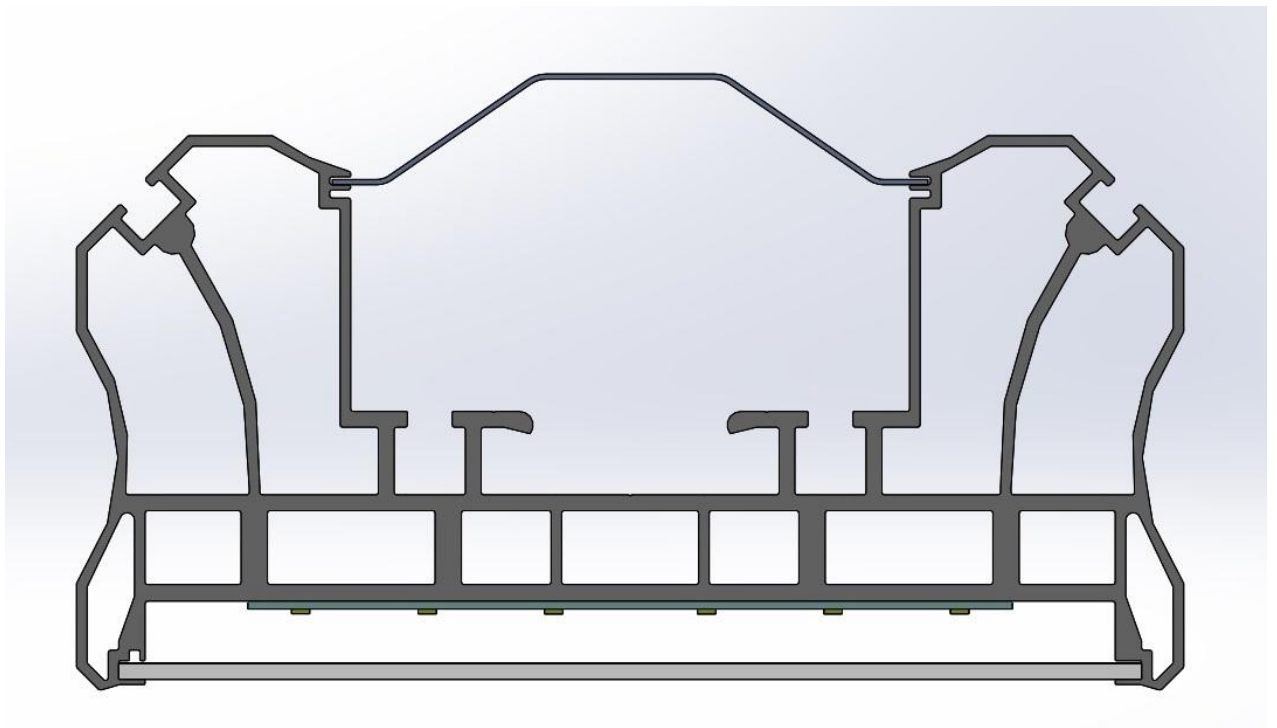


Рисунок 51 – Вид 3D модели сбоку

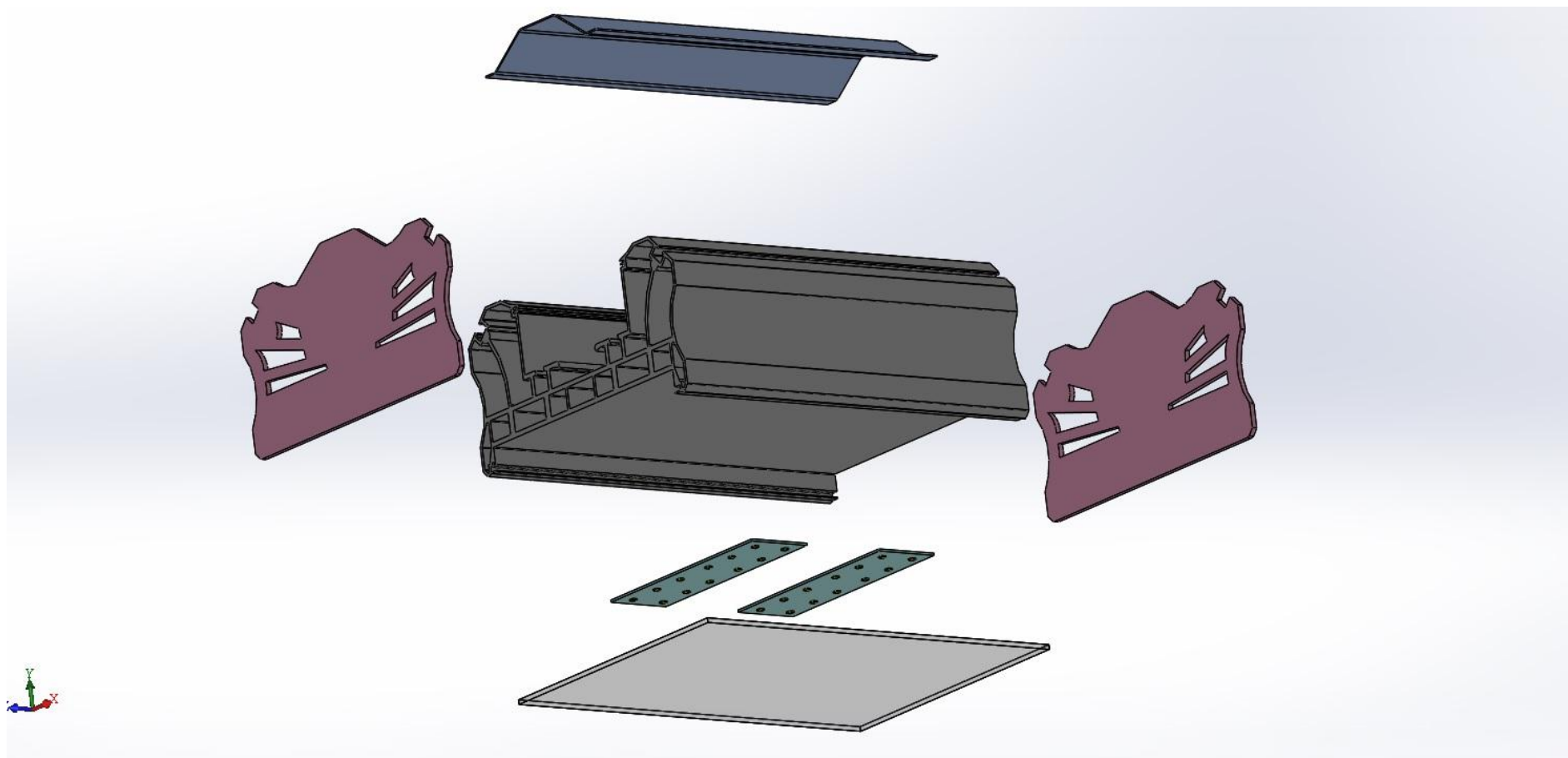


Рисунок 52 – Вид с разнесенными элементами исследуемого светодиодного светильника

Тепловое моделирование выполнялось в программной среде Solidworks Simulation аналогично моделированию единичного светодиода.

Полученные результаты оказались очень даже положительные. Рассмотрим и проведем анализ теплового моделирования.

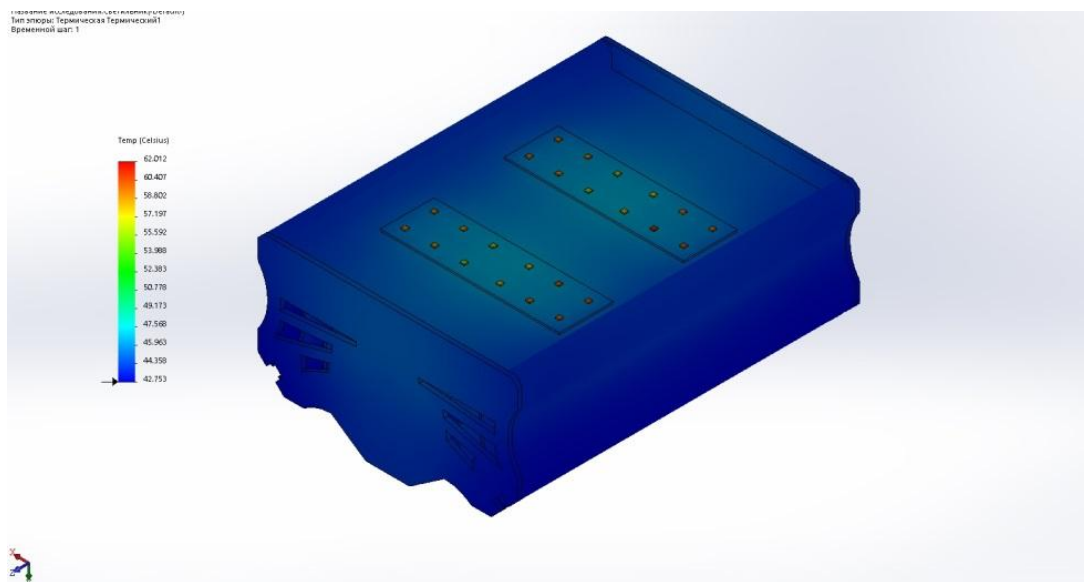


Рисунок 53 – Результаты компьютерного моделирования светодиодного светильника

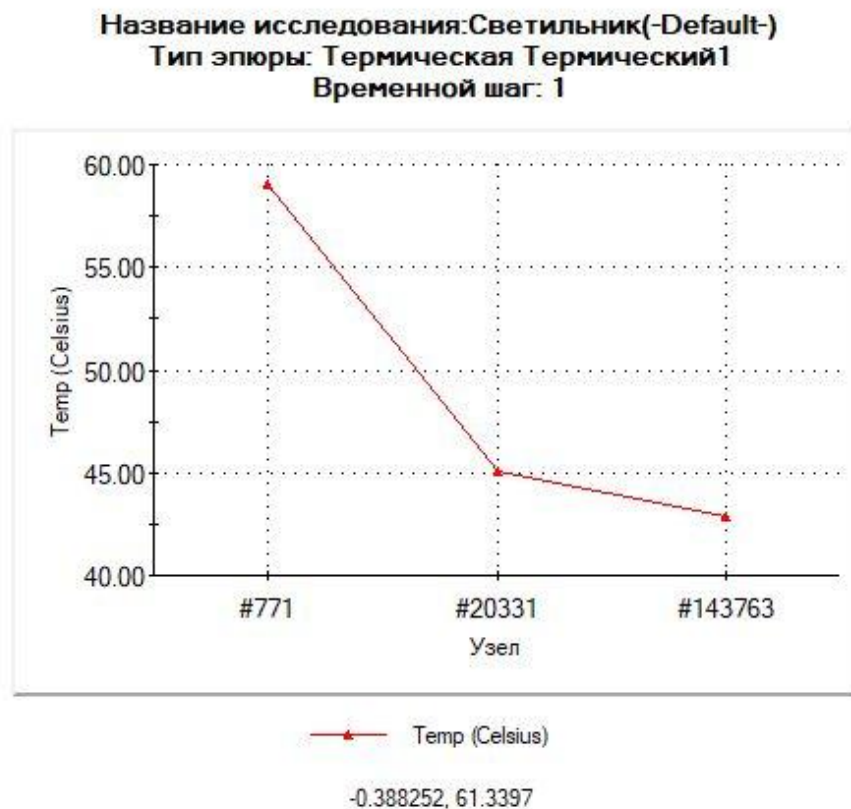


Рисунок 54 – График температуры светодиодного светильника

Верхняя точка графика соответствует точке на рисунке 55 в условной точке пайки светодиода.

Средняя точка графика соответствует температуре в точке между платой и охладителем из рисунка 55.

Нижняя точка графика соответствует температуре охладителя светодиод из рисунка 55.

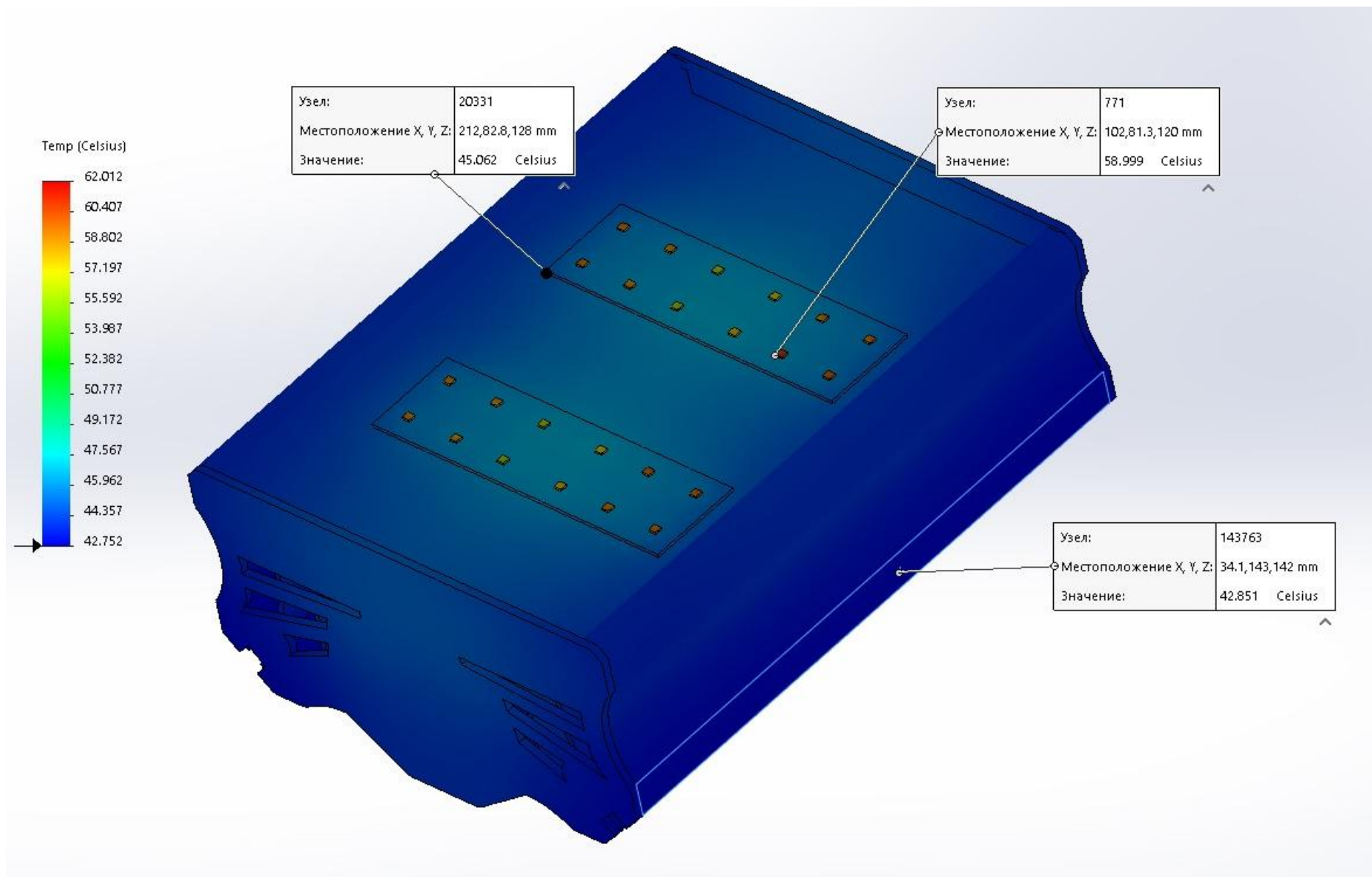


Рисунок 55 – Результат «зондирования»

3.5 Выводы по главе 3

1. Анализируя проделанную работу, можно сделать вывод, что результаты расчета, измерения и моделирования имеют разницу не более чем в 2-3 градуса по Цельсию, что говорит о правильности проведенного моделирования.
2. Стоит отметить затраченное время на выполнения проделанной работы по отдельным пунктам исследования. Конечно, метод измерения тепловизером является лидером, но стоит отметить, что для проведения замера необходимо изготовление опытного образца светодиодного устройства, что в свою очередь несет дополнительные финансовые расходы.
3. В сравнении формульного метода и экспериментального метода сделан вывод, что затраченное время одинаковое, но также как и для телевизионного замера необходимо изготовление опытного образца.
4. Опять же выполнение компьютерного моделирования по затратам времени значительно обходит формульный метод. Также, стоит отметить, что при выполнении расчетов формульным методом сложных светодиодных светильников имеется достаточная возможность для совершения ошибки при алгебраических операциях, что увеличит время расчета, либо расчеты и вовсе будут ложными.

Заключение

Ключевые выводы и итоги магистерской диссертации сводятся к нижеперечисленному:

1. Выполнен анализ современных решений охлаждения светодиодной продукции.
2. Проанализированная зависимость формы и метода охлаждения светодиодных светильников посредством сравнения их по экономическим параметрам и по критериям надежности, «гибкости» возможного применения в различных областях.
3. Предложен метод расчета полупроводниковых устройств формульным методом, который благодаря своей доступности в техническом плане показал достаточно простой и точный конечный расчет.
4. Выполнен глубокий анализ работы программного продукта SolidWorks Simulation на основе расчета единичного светодиода с целью освоения заданий граничных и начальных условий и, избежание искаженности результатов и неправильности расчета при исследовании сложного многоэлементного светодиодного светильника.
5. Выполнен анализ движения воздушных потоков с целью анализа воздушных пробок в программной среде SolidWorks FlowSimulation.
6. Сравнены полученные данные и сделаны предварительные выводы по эффективности работы с использованием программных сред компьютерного моделирования, тем самым показав насколько велика экономия, времени в сравнении с формульным расчетом и экспериментальным методом.
7. Получен результат формульного расчета сложного полупроводникового оборудования мощность 55 Вт и проведен его экспериментальный замер телевизионным устройством на реальном производственном объекте, а также проведен экспериментальный замер температурным устройством

(термопарой) с целью дальнейшего сравнения с результатами теплового моделирования в программной среде SolidWorks Simulation.

8. Выполнен расчет светодиодного светильника в программной среде и получены сравнительные данные с формульным расчетом, замером телевизионным оборудованием и экспериментальными данными.
9. По результатам сравнения отклонение конечных полученных результатов минимально и составляет не более 2-3 %.
10. Следствием полученных успешных результатов сделан вывод эффективного применения программных сред компьютерного моделирования, который в свою очередь позволяет без множественных итераций изготовления опытных образцов и выполнений тепловых замеров просчитывать максимальную тепловую мощность, выдерживаемую тем или иным спроектированным радиатором – охладителем. В свою очередь при отсутствии необходимости изготовления образцов в разы вырастает экономическая эффективность и существенная экономия времени.

Список использованных источников

1. Федеральный закон Российской Федерации от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rg.ru/2009/11/27/energo-dok.html> (дата обращения: 26.09.2018).
2. Светодиоды и их применение для освещения. Под общей редакцией ак. АЭН РФ Ю. Б. Айзенберга. М.: Знак, 2012.
3. Фотоника – научно-технический журнал [Электронный ресурс] URL: <http://www.photonics.su>
4. Принципы повышения энергоэффективности полупроводниковых световых приборов [Электронный ресурс] URL: <https://esu.citis.ru/dissertation/WUSGBHUA1JUVK82WYEQBFMP>
5. Ноэль Лотар / Охлаждение и регулирование температурных режимов светодиодов // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – № 3. – С. 13
6. Выбор оптимального режима работы светодиодных излучателей / Т.А. Барбасова, Е.В. Вставская, В.И. Константинов, В.О. Волков // Вестник ЮУрГУ. – 2010. – №2. – С. 48-51
7. Особенность эксплуатации светодиода / В. Константинов, Е. Вставкая, А. Вставский, М. Пожидай // Полупроводниковая светотехника. – 2011. – №5. – С. 56-57.
8. Вайман Д.А., Данилов В.С. Исследование способов эффективного отвода тепла в светодиодах поверхностного монтажа // Сб. науч. тр. НГТУ. – 2013. – №4. – С. 72-81.
9. Луценко Е.В. Температура перегрева активной области коммерческих светодиодов // Полупроводниковая светотехника. – 2011. – № 2. – С. 26–29.
10. Полищук А. Обеспечение теплового режима мощных светодиодных ламп при разработке светотехнических устройств/ А. Полищук // Современная электроника. – 2006. – №3.– С. 42-45.

11. Особенности эксплуатации светодиода / В. Константинов, Е. Вставкая, А. Вставский, М. Пожидай // Полупроводниковая светотехника. – 2011. – №5. – С. 56-57.
12. Выбор оптимального режима работы светодиодных излучателей / Т.А. Барбасова, Е.В. Вставская, В.И. Константинов, В.О. Волков // Вестник ЮУрГУ. – 2010. – №2. – С. 48-51.
13. Бабушкина Л.Г. Решение проблемы тепловода в светодиодной технике // Пермский национальный исследовательский политехнический университет. – 2012. – С. 271-274.
14. Феопентов А., Николаев Д. Основы теплового менеджмента при конструировании ПСП // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – №1. – С. 44-47.
15. Бородин С.М. Обеспечение тепловых режимов в конструкциях радиоэлектронных схем. Ульяновск, 2007.
16. Дульнеев Г.Н., Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. -М. Высш. шк., 1984.
17. Исакеев, А.И., Киселев И.Г., Филатов В.В. Эффективные способы охлаждения силовых полупроводниковых приборов: Энергоиздат, 1982. – 136
18. Скрипников Ю.Ф. Радиаторы для полупроводниковых приборов: Энергия, 1973. – 48 с.
19. Выбор оптимального режима работы светодиодных излучателей / Т.А. Барбасова, Е.В. Вставская, В.И. Константинов, В.О. Волков // Вестник ЮУрГУ. – 2010. – №2. – С. 48-51.
20. Маняхин Ф.И., Кудряшов В.Е., Туркин А.Н., Юнович А.Э. // Физика и техника полупроводников. - 1999. - Том 33. - Вып. 2. - С.224-232.
21. Бородин С.М., Обеспечение тепловых режимов в конструкциях радиоэлектронных средств. - Ульяновск: Ул. ГТУ, 2008. – 52.
22. Алямовский А.А. Инженерные расчёты в Solidworks Simulation. – ДМК-Пресс, 2010. – 235 с.

- 23.А. Полищук, Обеспечение теплового режима мощных светодиодных ламп при разработке светотехнических устройств // Современная электроника. 2006, №3, стр. 52-56.
- 24.Байнева И.И., Байнев В.В. Программная модель для оценки эффективности и надежности светодиодных источников света и приборов // Полупроводниковая светотехника. – 2011.– №3.– С. 40-42.
- 25.Поль А. Особенности расчета систем отвода тепла. // Полупроводниковая светотехника. 2010, №5, стр. 13-15.
- 26.Приборы осветительные, Светотехнические требования и методы испытаний, ГОСТ Р 54350-2011.
- 27.
- 28.K.C. Yung, H. Liem, H.S. Choy, Heat transfer analysis of a high-brightness LED array on PCB under different placement configurations, International Communications in Heat and Mass Transfer, Volume 53, April 2014, Pages 79–86.
- 29.Asiri Jayawardena, Yi-wei Liu, Nadarajah Narendran, Analysis of three different junction temperature estimation methods for AC LEDs, Solid-State Electronics, volume 86 (2013) Pages 11–16.
- 30.Young-Pil Kim, Young-Shin Kim, Seok-Cheol Ko, Thermal characteristics and fabrication of silicon sub-mount based LED package, Microelectronics Reliability, volume 56 (2016) pages 53–60.
- 31.U.S. Department of Energy. Lifetime of White LEDs. Building Technologies Program, Publication PNNL-SA-50957, April 2007.
- 32.Minseok Ha, Samuel Graham, Development of a thermal resistance model for chip-on-board packaging of high power LED arrays, Microelectronics Reliability, volume 52 (2012) pages 836–844.
- 33.K.C. Yung, H. Liem, H.S. Choy, Z.X. Cai, Thermal investigation of a high brightness LED array package assembly for various placement algorithms, Applied Thermal Engineering, volume 63, (2014) Pages 105–118.