

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа новых производственных технологий
 Направление подготовки 12.04.02 «Оптотехника»
 Отделение школы Материаловедения

Магистерская диссертация

Тема работы
Расчет и конструирование светодиодного светильника с заданным светораспределением
УДК: 628..94:628.953

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ВМ81	Калинин Ростислав Георгиевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Корепанов В.И.	д.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Концепция стартап-проекта»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Громова Т.В.			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Романцов И.И.	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
«Оптотехника»	Полисадова Е.Ф.	д.ф.-м.н.		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	Способность формулировать цели, задачи научного исследования или разработки в области светотехники и фотонных технологий и материалов, способность выделять и обосновывать критерии, на основании которых формируются модели принятия решений, составлять план работ, способность строить физические и математические модели объектов исследования и выбирать алгоритм решения задачи
P2	Способность разрабатывать программы экспериментальных исследований, применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы, защищать приоритет и новизну полученных результатов исследований в области обработки, изучения и анализа фотонных материалов, корпускулярно-фотонных технологий, оптоволоконной техники и технологии, в области оптических и световых измерений, люминесцентной и абсорбционной спектроскопии, лазерной техники, лазерных технологий и оборудования, взаимодействия излучения с веществом, производства и применения светодиодов
P3	Способность к профессиональной оценке проблем проектирования в области светотехники, оплотехники, фотонных технологий и материалов на основе подбора и изучения литературных и патентных источников. Способностью к разработке структурных и функциональных схем оптических, оптико-электронных, светотехнических приборов, лазерных систем и комплексов с определением их физических принципов работы, структуры и технических требований на отдельные блоки и элементы
P4	Способность к конструированию и проектированию отдельных узлов и блоков для осветительной, облучательной, оптико-электронной, лазерных техники, оптоволоконных, оптических, оптико-электронных, лазерных систем и комплексов различного назначения, осветительных и облучательных установок для жилых помещений, сельского хозяйства, промышленности
P5	Способность к разработке и внедрению технологических процессов и режимов сборки оптических и светотехнических изделий, к разработке методов контроля качества изготовления деталей и узлов, составлению программ испытаний современных

	светотехнических и оптических приборов и устройств, фотонных материалов.
P6	Способность эксплуатировать и обслуживать современные светотехнические и оптические приборы и устройства, соблюдать правила охраны здоровья и безопасности труда на производстве, выполнять требования по защите окружающей среды
<i>Универсальные компетенции</i>	
P7	Способность проявлять творческий, нестандартный подход, требующий абстрактного мышления, при решении конкретных научных, технологических и проектно-конструкторских задач в области фотонных технологий и материалов и светотехники, нести ответственность за принятые решения
P8	Способность к саморазвитию, самореализации, использованию творческого потенциала
P9	Способность к инновационной инженерной деятельности, менеджменту в области организации освоения новых видов перспективной и конкурентоспособной оптической, оптико-электронной и световой, лазерной техники с учетом социально-экономических последствий технических решений
P10	Способностью к координации и организации работы научно-производственного коллектива, принятию исполнительских решений для комплексного решения исследовательских, проектных, производственно-технологических, инновационных задач в области светотехники и фотонных технологий и материалов
P11	Способность к оценке современного состояния развития науки и техники, владение иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде с пониманием культурных, языковых и социально – экономических различий, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной инженерной деятельности
P12	Способность к сбору сведений, анализу и систематизации знаний об исследуемом объекте

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа Новых производственных технологий
 Направление подготовки (специальность) 12.04.02 «Оптотехника»
 Отделение Материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель
 ООП «Оптотехника» ОМ ИШНПТ
 Е.Ф. Полисадова

 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
4ВМ81	Калинин Р.Г.

Тема работы:

Расчет и конструирование светодиодного светильника с заданным светораспределением	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Статьи и материалы по теме диссертации 2. Объект проектирования – линейный светодиодный светильник для освещения складских помещений 3. Требования к изделию: Направленная диаграмма светораспределения Степень влаго- и пыле-защищенности IP: 65-67
---	---

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Обзор литературы и патентный обзор 2. Выбор оптимальных вариантов и расчет вторичной оптики с заданными параметрами КСС 5. Разработка конструкций светильника 6. Тепловой расчет и оптимизация конструкции светильника 7. Составление конструкторской документации
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Чертежи линз 2. Чертежи деталей 3. Сборочные чертежи светильников 4. Габаритные чертежи
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>И.И. Романцов</p>
<p>ВКР концепция-стартап</p>	<p>Т.В. Громова</p>
<p>Раздел ВКР на иностранном языке</p>	<p>О.В. Сумцова</p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	
<p>Литературный обзор</p>	

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	
--	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Корепанов В.И.	д.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ВМ81	Калинин Р.Г.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «КОНЦЕПЦИЯ СТАРТАП ПРОЕКТА»

Студенту:

Группа	ФИО
4ВМ81	Калинину Ростиславу Георгиевичу

Школа	Новых производственных технологий	Отделение (НОЦ)	Материаловедения
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	12.04.02 ОпTOTехника

Перечень вопросов подлежащих разработке:	
Проблема конечного потребителя, которую решает продукт, который создается в результате выполнения НИОКР	Освещение крытых помещений большой площади (производственные помещения ангарного типа; логистические центры; торговые залы универсамов и гипермаркетов)
Способы защиты интеллектуальной собственности	Коммерческая тайна, патентование
Объем и емкость рынка	Объем российского рынка: 7021,004 млн рублей
Современное состояние и перспективы отрасли, к которой принадлежит представленный в ВКР продукт	Одним из трендов развития светодиодной светотехники на 2019 год является создание изделий на основе мощных светодиодов и их постоянное совершенствование и удешевление, среди которых можно выделить промышленные световые приборы мощностью $P > 150$ Вт. Средний годовой темп роста рынка промышленных осветительных приборов составляет 5%.
Себестоимость продукта	Сумма первоначальных капиталовложений: Себестоимость от 2 261 до 56 525 рублей за готовый продукт
Конкурентные преимущества создаваемого продукта	<ul style="list-style-type: none"> - Малый вес и габариты единичного модуля. Так для единичного модуля длиной 0,5 м при мощности 100 Вт/м вес составляет ~ 1 кг. - Более эффективное охлаждение, за счет улучшенной циркуляции воздуха; - Возможность варьирования мощности в широких пределах (~ 40-1000 Вт)
Сравнение технико-экономических характеристик продукта с отечественными аналогами	На основании конкурентных преимуществ
Целевые сегменты потребителей продукта	Рынок В2В. Промышленное освещение: производственные помещения ангарного типа; логистические центры; торговые залы универсамов и гипермаркетов
Бизнес модель проекта	Модель по А. Остервальдеру и И. Пинье
Производственный план	Планируемый годовой объем производства: 15 000 ÷ 20 000 модулей различных модификаций.)
План продаж	Планируемый годовой объем производства и продажи светильников: 15 000 ÷ 20 000 модулей различных модификаций. Выполнение работ только по предварительному утверждению с клиентом технических характеристик светильника (не на склад)
Перечень графического материала:	
При необходимости предоставить эскизные графические материалы	Модель по А. Остервальдеру и И. Пинье. Таблицы расчета бюджета проекта, график расчета себестоимости

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	02.03.2020
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Громова Т.В.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ВМ81	Калинин Ростислав Георгиевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
4ВМ81	Калинин Ростислав Георгиевич

Школа	Отделение (НОЦ)	12.04.02
Уровень образования	Магистратура	Оптотехника

Тема ВКР:

Расчет и конструирование светодиодного светильника с заданным светораспределением	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<p><i>Объект исследования – линейный светодиодный светильник-радиатор.</i></p> <p><i>В работе выполняется ряд камеральных работ (компьютерное моделирование, обработка результатов расчета, построение графического материала, набор текста, разработка макета светового прибора). Рабочее место расположено в лаборатории импульсной оптической спектроскопии помещения 33,6 м2. Имеет естественное и искусственное освещение, компьютерные столы с полочками для литературы, компьютер.</i></p> <p><i>Области применения разрабатываемого светильника – промышленное освещение (складские и производственные цеха), торговое освещение, уличное освещение больших площадей, спортивное освещение открытых и крытых спортивных сооружений.</i></p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:	<p><i>ГОСТ 12.0.003-2015</i> <i>ФЗ от 22.07.2008 N 123-ФЗ</i> <i>СанПиН 2.2.4.3359-16</i> <i>СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03</i> <i>Р 2.2.2006-05</i> <i>ГОСТ 12.1.038-82</i> <i>ГОСТ 12.1.018-93</i> <i>ГОСТ Р 55090-2012</i></p>
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	<p><i>1. Вредные факторы:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Освещение рабочей зоны - Микроклимат в помещении - Зрительное напряжение - Степень нервно-эмоционального напряжения; - Монотонность труда; - Шум. <p><i>2. Опасные факторы:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Электрический ток; - Короткое замыкание - Статическое электричество
3. Экологическая безопасность:	<ul style="list-style-type: none"> - Правила утилизации ПК и комплектующих; - Правила утилизации макулатуры; - Правила утилизации светодиодных и люминесцентных ламп

4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	<i>Определить перечень наиболее возможных ЧС: пожар, взрыв, разрушение зданий в результате разрядов атмосферного электричества, ураган, землетрясение. Наиболее актуальная ЧС – возникновение пожара;</i>
--	---

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	02.03.2020
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Романцов И.И.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ВМ81	Калинин Ростислав Георгиевич		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 201 с., 66 рис., 31 табл., 40 источника.

Ключевые слова: светодиод, светильник, освещение, тепловой расчет, светотехнический расчет.

Объектом исследования является линейный светодиодный светильник радиатор.

Цель работы - разработка универсального модульного светодиодного светильника-радиатора с эффективной системой теплоотвода и вторичной оптикой, обеспечивающей требуемое распределение света.

В процессе исследования проводились сбор, обработка и систематизация литературных данных об основных тенденциях в области светодиодного освещения, подходах к конструированию светодиодных светильников, основных требованиях, предъявляемых к световыми приборам и осветительным установкам, предназначенным для освещения складских помещений. Освоена методика расчета тепловых режимов работы световых приборов с использованием ПО «Solidworks Flow simulation», проведен экономический анализ работ, определены мероприятия по технике безопасности.

В результате исследования разработан универсальный, модульный, линейный, светодиодный светильник с заданным светораспределением, сделаны выводы о влиянии конструкции «плавника» на температурные режимы работы светового прибора.

В результате оптического расчета получены кривые силы светораспределения; выполнен светотехнический расчет осветительной установки для освещения склада стеллажного хранения; проведен анализ основных областей применения предлагаемой разработки.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики светильника:

- Тип источника света – LED
- Индекс цветопередачи – >80
- Коррелированная цветовая температура – 4500, 4750, 5000 К
- Световая отдача – 94 лм/Вт
- Напряжение питания – 230 В
- Температурный режим работы – от -10 до +35 °С
- Коэффициент пульсации – <5%

Область применения:

- Производственные помещения ангарного типа;
- Торговые залы универсамов и гипермаркетов;
- Спортивные площадки закрытого типа;
- Офисное освещение.

Экономическая значимость работы обусловлена анализом и оптимизацией конструкции светового прибора с целью снижения себестоимости изготовления конечного продукта, и повышением конкурентоспособности предлагаемой разработки.

В дальнейшем планируется подача заявки на патент предлагаемой разработки и изготовление опытного образца.

Нормативные ссылки

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

1. Гост 12.0.003-2016. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация
2. ГОСТ 12.1.038-82 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов (с Изменением N 1)
3. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы
4. ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования. – Дата введения 1979-01-01
5. ГОСТ 12.2.033-78 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования. – Дата введения 1979-01-01
6. ГОСТ 12.2.049-80 ГОСТ 12.2.049-80 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Оборудование производственное. Общие эргономические требования. – Дата введения 1982-01-01
7. СанПиН 2.2.4.3359-16 Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах
8. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*
9. ГОСТ 12.1.038-82 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов (с Изменением N 1)
10. ТОИ Р-45-084-01. Типовая инструкция по охране труда при работе на персональном компьютере" (утв. Приказом Минсвязи РФ от 02.07.2001 N 162)
11. Федеральный Закон от 27.07.2006 г. № 152-ФЗ «О персональных данных»
12. ФЗ об отходах производства и потребления от 24.06.1998 N 89-ФЗ

13. Постановление Правительства РФ от 3 сентября 2010 г. N 681 «Об утверждении Правил обращения с отходами производства и потребления в части осветительных устройств, электрических ламп, ненадлежащие сбор, накопление, использование, обезвреживание, транспортирование и размещение которых может повлечь причинение вреда жизни, здоровью граждан, вреда животным, растениям и окружающей среде»

14. «Трудовой кодекс Российской Федерации» от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 03.07.2016) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2017)

15. ГОСТ Р 54350-2015 Приборы осветительные. Светотехнические требования и методы испытаний

16. ГОСТ Р МЭК 60598-1-2011. Светильники. Часть 1. Общие требования и методы испытаний

Обозначения и сокращения

ОУ – Осветительная установка

СД, СИД – светодиод, светоизлучающий диод

НИР – научно-исследовательская работа

СП – световой прибор

Оглавление

Введение.....	17
Глава 1. Обзор литературы.....	19
1.1 Анализ рынка светодиодной светотехники.....	19
1.2 Подходы к проектированию мощных светодиодных светильников	27
1.3 Требования к освещению и световым приборам.....	29
Глава 2. Используемые методы и методики расчетов и измерений	35
2.1 Определение общих принципов анализа и расчета тепловых режимов работы светодиодных светильников	35
2.2 Прототипирование	49
2.3 Моделирование тепловых режимов работы светильника в программном комплексе «Solid works 3D CAD /Solid works Flow simulation».....	51
Глава 3. Расчет и проектирование модуля светильника Ошибка! Закладка не определена.	
3.1 Эскиз универсального модульного светильника	Ошибка! Закладка не определена.
3.2 Макет модуля.....	Ошибка! Закладка не определена.
3.3 Анализ и расчет вторичной оптики.....	Ошибка! Закладка не определена.
3.4 Светотехнический расчет	Ошибка! Закладка не определена.
3.5 Тепловая нагрузка и оптимизация конструкции светильника на основе теплого расчета.....	Ошибка! Закладка не определена.
3.6 Конструкция светового прибора.....	Ошибка! Закладка не определена.
Глава 4. Электропитание светодиодного светильника... Ошибка! Закладка не определена.	
4.1 Электрическая схема питания.....	Ошибка! Закладка не определена.
4.2 Драйвер для светильника	Ошибка! Закладка не определена.
Глава 5. Области применения разрабатываемого светового прибора.....	99
Глава 6. Концепция стартап-проекта	100
6.1 Название	100
6.1 Основные качества продукта, решаемая продуктом проблема.....	100

6.2	Защита интеллектуальной собственности	101
6.3	Объем и емкость рынка	101
6.4	Анализ современного состояния и перспектив отрасли	102
6.5	Расчет себестоимости продукта.....	103
6.6	Конкурентные преимущества продукта и обзор технико-экономических характеристик аналогов.....	107
6.7	Бюджет проекта, период окупаемости.....	109
6.8	Описание целевых сегментов потребителей	111
6.9	Бизнес-модель проекта	112
6.10	Стратегия продвижения продукта на рынок	115
	Глава 7. Социальная ответственность.....	Ошибка! Закладка не определена.
7.1	Введение.....	Ошибка! Закладка не определена.
7.2	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	Ошибка! Закладка не определена.
7.3	Производственная безопасность.....	Ошибка! Закладка не определена.
7.4	Анализ опасных и вредных производственных факторов	Ошибка! Закладка не определена.
7.5	Психофизические факторы	Ошибка! Закладка не определена.
7.6	Электробезопасность	Ошибка! Закладка не определена.
7.7	Экологическая безопасность.....	Ошибка! Закладка не определена.
7.8	Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	Ошибка! Закладка не определена.
7.9	Заключение	Ошибка! Закладка не определена.
	Заключение	Ошибка! Закладка не определена.
	Используемая литература.....	Ошибка! Закладка не определена.
	Приложение А	Ошибка! Закладка не определена.
	Приложение Б.....	156
	Приложение В.....	181

Введение

Среди всех существующих типов источников белого света, различающихся по физическому принципу, наибольшее внимание привлекают твердотельные полупроводниковые диоды (светоизлучающие диоды, светодиоды, СД, СИД). Благодаря таким преимуществам как низкое энергопотребление, высокая светоотдача, длительный срок службы, надежность, малые размеры источника, светодиоды широко применяются практически во всех областях нашей повседневной жизни: для наружного и внутреннего освещения, дорожного освещения, на кораблях, автомобилях и т.п. Совершенствование технологии производства сделало возможным получение более дешевых СИД с высоким индексом цветопередачи ($Ra > 90$), а также светодиодов с возможностью изменения цветовой температуры. Таким образом создание различных устройств на основе данного типа источников света представляет - наиболее активно развивающаяся и перспективная отрасль светотехники.

Рынок светодиодной осветительной техники формируется исходя из многих факторов, в том числе на основе тенденций развития освещения, государственной политики в области стимулирования энергосберегающих технологий, динамики и направлений изменения потребительских предпочтений, конкурентной среды, нормативной базы и пр. Высокие светотехнические параметры и характеристики светодиодов, такие как: светоотдача, CRI, мощность и др., в сочетании с уменьшением их цены открыли новые широкие возможности использования светодиодов в осветительной технике. Одним из трендов развития светодиодной светотехники на 2019 год является создание изделий на основе мощных светодиодов и их постоянное совершенствование и удешевление. Среди них можно выделить световые приборы мощностью $P > 150$ Вт.

Основные проблемы при создании мощных светильников состоят в требованиях, предъявляемых к их конструкции, теплоотводу,

светотехническим параметрам, которые определяются их назначением и условиями эксплуатации. При этом широкое применение светодиодных установок большой мощности на данный момент остается ограниченным, вследствие сохранения высокой стоимости конечной осветительной установки.

Цель работы - разработка универсального модульного светодиодного светильника-радиатора с эффективной системой теплоотвода и вторичной оптикой, обеспечивающей требуемое распределение света.

Задачи:

- Анализ подходов к проектированию мощных светодиодных светильников;
- Выявление требований, предъявляемых к освещению и световым приборам (СП);
- Разработка эскиза универсального модульного светильника в соответствии с предлагаемой концепцией;
- Анализ и расчет вторичной оптики;
- Светотехнический расчет;
- Разработка конструкции универсального модульного светильника. Тепловой расчет. Оптимизация конструкции СП;
- Составление конструкторской документации.

Глава 1. Обзор литературы

1.1 Анализ рынка светодиодной светотехники

1.1.1 Энергосбережение

Началом активного развития светодиодной светотехники в РФ можно считать середину и конец 2000-х годов, поскольку именно в этот период начинается активная разработка новых законов, направленных на повышение энергетической эффективности используемых ресурсов, а в стране закладывается направление на развитие нового для России рынка энергосберегающих технологий и возобновляемых источников энергии.

Основным федеральным законом послужившим толчком для развития энергосберегающих технологий является закон № 261-ФЗ от 23 ноября 2009 года «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», основными требованиями Закона № 261-ФЗ являются:

- Обязательная установка приборов учета энергоресурсов;
- Обеспечение энергоэффективности зданий, строений, сооружений;
- Введение запрета на оборот товаров, имеющих низкую энергетическую эффективность;
- Обязанность снизить расходы бюджетных учреждений на потребление энергоресурсов на 3% ежегодно в течение 5 лет;
- Обязательные энергообследования не реже 1 раз в 5 лет:
 - органов государственной власти, органов местного самоуправления;
 - организаций с участием государства или муниципального образования;
 - организаций, совокупные годовые затраты которых на потребление энергоресурсов превышают 10 миллионов рублей.

В свою очередь бурное развитие светодиодной светотехники послужило толчком для развития нормативной базы, регламентирующей требования

предъявляемые к современным осветительным установкам. Основными нормативными документами, предъявляющими требования к ОУ офисного, промышленного, спортивного, торгового и наружного освещения, а также требования к световым приборам являются:

- СП 52.13330-2016;
- СП 440.1325800.2018;
- ГОСТ Р 54350-2015.

Быстрый рост эффективности СД позволил догнать по световой отдаче газоразрядные лампы и у современных промышленных светодиодов она приблизилась к 200 лм/Вт. При этом стоимость их массового производства падает, а области применения и рынок потребления постоянно расширяются.

Наибольшее применение нашли световые приборы на основе светодиодов в следующих областях:

- Офисно-административное освещение. Светодиодные светильники позволяют дизайнерам интерьеров создавать индивидуальные проекты с комфортной средой освещения различных зон;
- Промышленное освещение, которое получило новое качество благодаря использованию специальных светодиодных кластеров. Большие сроки эксплуатации без обслуживания позволяют применять эти светильники в труднодоступных местах промышленных объектов;
- Торговое освещение - сегмент, в котором лидируют светильники для локального и направленного освещения с хорошими параметрами излучения;
- Наружное освещение, в котором наиболее востребованы светильники для архитектурной подсветки, садово-паркового освещения, освещения стоянок, прогулочных дорожек. Разрабатываются также высокоэффективные светильники для уличного освещения, которые постепенно вытесняют натриевые и металлогалогенные лампы;

- Специальное освещение для медицинских учреждений, ЖКХ, аварийного освещения объектов различного назначения и т.д.

1.1.2 Производители светодиодной светотехники

Рынок светодиодной светотехники представлен в настоящее время следующими основными производителями (группами):

1. Европейские корпорации, выпускающие продукцию под собственными брендами, зарекомендовавшие себя и хорошо известные потребителям;
2. Китайские производители светотехники, в т.ч. светодиодных светильников. Кроме брендированной продукции, производство которой было перенесено в Китай, КНР выпускает светильники собственного производства, рассчитанные на самые различные рынки (США, Европа, Россия). В РФ поступает в основном продукция низкого качества. Это обусловлено тем, что деятельность китайских производителей направлена на снижение конечной стоимости светильника, что обеспечивается постоянным снижением затрат на производство изделий. При этом значительное снижение затрат достигается не путем совершенствования технологии изготовления световых приборов, а использования комплектующих низкого качества. Такая экономия, естественно, приводит к ухудшению качества конечного продукта.
3. Российские производители светодиодной светотехники:
 - Компании, специализирующиеся на светодиодном осветительном оборудовании;
 - Крупные Российские игроки, обладающие более широкой номенклатурой изделий и выпускающие как светодиодные, так и ламповые светильники.

Светодиодные светильники, представленные на российском рынке известными крупными европейскими брендами, достаточно дороги. Это объясняется высокими производственными затратами крупных компаний, затратами на растаможивание и транспортировку, а также ценой «раскрученного» бренда.

Дешёвые китайские светильники поставляются без каких - либо гарантий и могут прослужить недолго. Существуют и качественные китайские светодиодные светильники, но они уходят на европейский и американский рынки.

Российские производители светодиодных светильников и систем, обладающие квалифицированными кадрами и использующие современные технологии производства, обеспечивают оптимальное соотношение «цена-качество» для потребителя. По этому соотношению («цена-качество») конкурентов российскому производителю в нашей стране немного.

Гибкость в разработке и производстве, а также учёт всех нюансов при создании не только самого светильника, но и систем управления и питания – одно из важнейших преимуществ российского производителя. Ни один из европейских или китайских производителей не будет разрабатывать и производить специально под конкретный проект единичные модели светильников. С этим может справиться только российский производитель.

Российские производители постоянно и активно расширяют свои линейки продукции, основываясь на потребностях российских заказчиков, учитывая мировой опыт производства светодиодных светильников.

Российские производители предлагают своим заказчикам комплексный подход, чего не может предложить ни один китайский производитель. Помимо собственного оборудования, почти все производители готовы выполнять весь спектр необходимых работ для создания комплексных систем освещения, в том числе это и услуги по оценке освещенности, разработка индивидуальных светотехнических дизайн-проектов, разработка и согласование проектно-сметной документации, пуско-наладка оборудования, гарантийное и сервисное обслуживание и т.д. [1].

Основные преимущества и недостатки каждой группы производителей представлены в таблице 1.

Таблица 1 – сравнительный анализ продукции производителей светодиодной светотехники [1]

Страна	РФ	КНР	Европа, США
Преимущества	Оптимальное соотношение цена-качество; Гибкость в разработке и производстве; Комплексный подход; Обеспечение гарантийных обязательств	Широкий ассортимент продукции; Низкие цены на светильники	Широкий ассортимент продукции; Высокое качество; Обеспечение гарантийных обязательств
Недостатки	Часть производителей использует дешёвые китайские комплектующие, что приводит к ухудшению качества конечной продукции	Зачастую низкое качество продукции; Неадаптированные к российскому рынку схемные решения; Отсутствие гарантийных обязательств и сервисного обслуживания; Отсутствие комплексных системных решений в части проектирования и реализации масштабных проектов	Высокая цена светильников, обусловленная высоким уровнем заработной платы в европейских странах и США, транспортными расходами, таможенными пошлинами, а также высокой наценкой за известный на рынке бренд; Дорогостоящая адаптация оборудования к российским проектам

1.1.3 Тенденции на рынке светодиодной светотехнике

За последнее десятилетие благодаря популяризации светодиодной продукции рынок светодиодной светотехники продолжает стремительно расти и развиваться. На 2019 год определяющими тенденциями в развитии рынка осветительных приборов в России являются следующие [2]:

- повышение энергоэффективности осветительных приборов за счет совершенствования технологии и оптимизации производства источников света (светодиодов), разработки более совершенных схемных решений для электронных ПРА;
- поиск и применение в световых приборах новых материалов, улучшающих качество конечной продукции, повышающих срок службы приборов и уменьшающих их вес и габариты;

- Разработка и применение электронных ПРА поддерживающих опции управления и регулирования единичными приборами или группы световых приборов, входящих в состав осветительной установки

Согласно данным, представленных консалтинговой компанией «Лайтинг Бизнес Консалтинг» [3], на 2018 год рост доли светодиодных светильников составил 7%, достигнув 24,4% в общем объеме установленных улично-дорожных светильников.

В 2017-2018 годах в городах и на региональных дорогах России преобладают натриевые светильники, занимая более половины от общего объема всего освещения по типу источников света.

Более 530 тысяч новых светодиодных светильников было установлено в Российской Федерации в 2018 году. В 2017 году их доля составляла 57,1% от общего числа светоточек. В 2018 году, доля натриевых светильников сократилась на 4,2% и составила 52,1%.

Ртутные светильники, составлявшие 20,3% парка в 2017 году, в 2018 году так же сократили свою долю на 2,1%, составив 18,2% в общем объеме улично-дорожного освещения.

Доля металлогалогенных и прочих светильников составляет менее 5% и также постоянно сокращается.

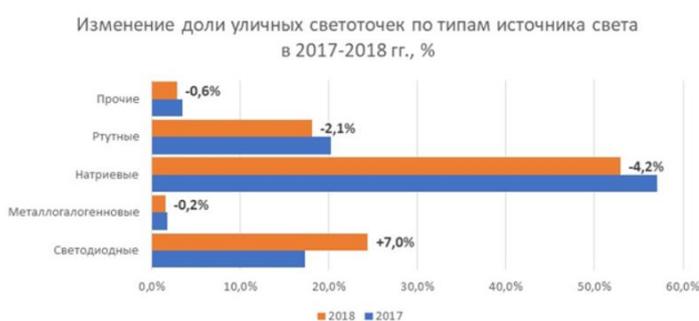


Рисунок 1 – Изменение доли уличных светильников с различными типам источника света [3]

Как отмечается на информационном сайте агентства рост применения светодиодных светильников в сегменте улично-дорожного освещения вызван прежде всего совершенствованием технологии, а также рядом

государственных мер по переходу на энергосберегающие технологии, в том числе: федеральной целевой программой (ФЦП) "Энергосбережение России", ФЦП "Повышение безопасности дорожного движения в 2013-2020 годах" и применением механизмов энергосервисного контракта [3].

В 2018 году сегмент профессиональных светильников (офисное и уличное освещение, профессиональное оборудование и т.д.) прибавил 6 процентов. По словам Сергея Боровкова (Генеральный Директор «Лайтинг Бизнес Консалтинг»): «На светодиодные лампы в России уже приходится половина рынка освещения, за 2016-2018 годы их доля выросла на 22 процента» [4].

Кроме того, поспособствует развитию рынка комплексный план модернизации и расширения магистральной инфраструктуры до 2024 года. Из 6,5 триллиона рублей, которые планируется потратить на транспортную инфраструктуру, серьезная часть пойдет на оснащение морских портов, логистических центров, железнодорожных и других объектов необходимым светодиодным освещением [4].

Одним из следствий широкого развития светодиодной светотехники является создание изделий на основе мощных светодиодов, среди которых наиболее активно развиваемой подотраслью является разработка световых приборов мощностью $P > 150$ Вт.

Светодиодные светильники большой мощности наиболее востребованы в следующих областях:

- Промышленное освещение (складские и производственные цеха);
- Спортивное освещение открытых и крытых спортивных сооружений;
- Уличное освещение больших площадей, парковок;
- Фито светильники и фитотроны большой мощности.

Помимо широкого развития светодиодной светотехники, еще одним фактором способствующим широкому распространению мощных светодиодных светильников является ужесточение требований, предъявляемых к осветительным установкам. Здесь необходимо подчеркнуть,

что более высокие требования к осветительным установкам не несут негативного характера для бизнеса, а наоборот стимулирует развитие отрасли. В свою очередь высокие требования к ОУ позволяют создать стимулирующее освещение на рабочем месте, не утомляющее глаз человека.

Несмотря на постоянное совершенствование светодиодных источников света и повышению их эффективности одной из главных задач является проблема теплоотвода, которая сохраняется по сей день. При разработке световых приборов мощностью более 150 Вт вопрос теплоотвода представляет собой одну из ключевых задач которую необходимо решить инженеру-конструктору. Применение решений и подходов аналогичных применяемым для маломощных световых приборов позволяет в какой-то мере решить эту проблему. Однако едва ли этот подход можно назвать высокоэффективным.

В первую очередь это сказывается на стоимости изготовления световых приборов. Так как одним из основных элементов конструкции светового прибора является алюминиевый радиатор, масса (объем расходуемого материала) которого оказывает прямое влияние на себестоимость конечного продукта. Очевидно, что простое уменьшение объема используемого материала не позволит решить проблему, поскольку необходимо обеспечить требуемые тепловые режимы работы, которые в свою очередь на прямую оказывают влияние на светотехнические и электрические параметры светодиодов.

Обобщая вышесказанное можно выделить следующие ключевые изменения в развитии рынка светодиодной светотехники:

- для заказчика светодиоды сейчас переходят в категорию привычного продукта. В целом заказчик стал более грамотно подходить к вопросу освещения и использования светодиодных светильников, что в свою очередь привело к росту спроса на более качественную отечественную продукцию, несмотря на более высокие цены по отношению к китайской;

- Проблема теплоотвода сохраняется по сей день. Решением данной проблемы занимаются как инженеры-конструкторы разрабатывающие светильники, так и производители светодиодов, занимающиеся непосредственно разработкой новых высокоэффективных светодиодов.

1.2 Подходы к проектированию мощных светодиодных светильников

Два основных подхода применяются при создании таких светильников

1.2.1 Проектирование модульных светодиодных светильников

1.2.2. Проектирование цельнокорпусных светодиодных светильников

1.2.1 Проектирование модульных светодиодных светильников

В основу такого подхода заложено применение модуля (модульного светильника) мощностью до 120 Вт. При этом мощности $P \geq 200$ Вт достигаются за счет компоновки светильников из отдельных модулей. В качестве примера такой системы рассмотрим светильник компании «LED CONCEPT» «Модуль» (рисунок 2). Суммарная мощность светящегося прибора составляет 288 Вт. В данном СП используется 3 светодиодных модульных светильника, мощность каждого модуля составляет 96 Вт. Масса светильника – 8,4 кг. Габаритные размеры: 450x360x120 мм (ДШВ).



Рисунок 2 – Светильник компании «LED CONCEPT» «Модуль» [5]

Основными преимуществами модульных светильников являются:

- Возможность варьирования мощности в широких пределах путем комбинирования модулей без каких-либо значительных изменений в конструкции прибора.
- Надежность и ремонтпригодность системы, поскольку при выходе из строя одного из модулей светильника последний можно легко заменить на новый.

1.2.2 Проектирование цельнокорпусных светодиодных светильников

При разработке цельнокорпусного светильника большой мощности создается цельный металлический корпус, в котором непосредственно располагаются светодиоды и зачастую блок питания. Примером такой системы может быть светильник компании «FERON» Feron LL-926 IP65 300W 6400K (рисунок 3). Потребляемая мощность СП составляет 300 Вт. Масса светильника ~ 10-12 кг. Габаритные размеры (без учета крепления): 529x55x415 мм (ДШВ).



Рисунок 3 – Светильник компании «FERON» Feron LL-926 IP65 300W 6400K [6]

Ключевыми недостатками такой системы являются отсутствие возможности варьирования мощности СП без значительных изменений конструкции светильника, а также не ремонтпригодность светильника.

К преимуществам можно отнести меньшее количество используемых деталей в одном светильнике, что в свою очередь оказывает значительное влияние на скорость процесса изготовления и сборки одного СП, а, следовательно, на конечную себестоимость изделия.

Из рассмотренных подходов наиболее привлекательным является первый, включающий разработку отдельного универсального модуля для последующей сборки из них светильников различной мощности.

Поэтому все больше производителей отказываются от использования цельнокорпусных светильников большой мощности выбирая модульные системы, обеспечивающие не только более широкий модельный ряд, но и как было сказано выше большую надежность. Модульные световые приборы широко применяются для освещения:

- Производственных помещений (складские и производственные цеха);
- Спортивных площадок открытого и закрытого типа;
- Дорог, больших площадей, парковок;
- Растений (фито светильники и фитотроны большой мощности).

Среди российских производителей модульные световые приборы активно применяют такие компании как: «SDSVET», «LEDEL», «DIORA», «Световые технологии», «LUXON», «DURAY», «Светотроника», «LEDeffect», «MasterLED», «VARTON» и другие. Таким образом наиболее крупные российские производители светодиодной светотехники активно применяют системы освещения с модульными световыми приборами.

1.3 Требования к освещению и световым приборам

В качестве системы, на которой будет отрабатываться предложенная технология была взята светотехническая установка (СУ) предназначенная для освещения склада стеллажного хранения.

1.3.1 Требования к освещению складов стеллажного хранения

Основными нормативными документами, регламентирующими требования к освещению и световым приборам, используемым для освещения складов со стеллажным хранением, являются:

- СП 52.13330.2016;
- ГОСТ Р 54350-2015.

В данной работе предлагается разработать световой прибор для освещения склада стеллажного хранения, имеющего следующие размеры:

- Длина – 112 м,
- Ширина – 96 м,
- Высота – 15,2 м.

Согласно выше указанных нормативных документов существуют следующие требования и рекомендации к освещению складских помещений:

- Горизонтальная освещённость на уровне 0,8 м (Г-0,8) в зоне приемы и выдачи груза – 200 лк;
- Горизонтальная освещённость на пола (Г-0,0) в зоне транспортно-распределительные системы – 200 лк;
- Вертикальная освещённость в зоне хранилищ на ячейках – 75 лк;
- Объединенный показатель дискомфорта UGR, не более – 25;
- Коэффициент пульсации освещенности, %, не более – 20;

1.3.2 Светотехнические требования к световым приборам для производственных помещений

Нормативным документом, устанавливающим светотехнические требования к светильникам, предназначенным для производственных помещений является ГОСТ Р 54350-2015. Согласно данного стандарта к светильникам устанавливаются следующие требования:

1.3.2.1 Класс светораспределения и тип кривой силы света светильников должны соответствовать требованиям пункта 5.1 настоящего ГОСТа;

1.3.2.2 Светильники с открытым выходным отверстием должны иметь в нижней полусфере защитный угол не менее 15° :

- в любой меридиональной плоскости - для круглосимметричных светильников;
- в главной продольной и поперечной плоскости - для симметричных и асимметричных светильников.

Допускается изготовление светильников с защитным углом менее 15° и без защитного угла с указанием условий их применения в технических условиях и эксплуатационной документации на светильники конкретных типов или групп.

1.3.2.3 КПД светильников с лампами должен быть, %, не менее:

- 60 - для светильников с призматическим рассеивателем и отражателем;
- 70 - для светильников с экранирующими элементами;
- 80 - для светильников с открытым выходным отверстием.

Допускается снижение КПД не более чем на 5% для светильников:

- с двумя и более разрядными лампами;
- с диффузным отражателем;
- с экранирующими элементами, создающими защитный угол более 40° ;
- с защитной сеткой.

При наличии нескольких указанных факторов одновременно допускается суммарное снижение КПД не более чем на 10%.

1.3.2.4 Световая отдача светильников с СД потребляемой мощностью не менее 30 Вт должна быть не менее 85 лм/Вт.

1.3.2.5 В технических условиях и эксплуатационной документации на светильники конкретных типов или групп должны быть указаны следующие светотехнические параметры:

- класс светораспределения;
- тип кривой силы света;
- защитные углы;

- КПД;
- световая отдача;
- КЦТ светильников, поставляемых с лампами.

Для светильников со специальным распределением силы света должны быть приведены одна или несколько кривых силы света с указанием соответствующих характерных меридиональных плоскостей.

1.3.3 Требования, предъявляемые к тепловому режиму работы

В соответствии с ГОСТ Р МЭК 60598-1-2011 при тепловых испытаниях в нормальном режиме работы температура любой детали светильника, подверженной тепловому разрушению при эксплуатации, не должна превышать значение, при котором обеспечивается регламентированный срок службы светильника конкретного типа. Общепринятые значения температур для основных деталей светильников приведены в таблице 2, а значения температур для традиционных материалов, которые применяют в светильниках, перечислены в таблице 3. Температура не должна превышать значений, указанных в таблицах 2 и 3, более чем на 5 °С. Допуск 5 °С учитывает неизбежный разброс измерений температуры в светильниках.

Таблица 2 – Допустимые температуры основных деталей СП [7]

Деталь	Максимальная температура, °С
Монтажная поверхность: - из нормально воспламеняемого материала - из негорючего материала	90 Не измеряется
Детали, к которым часто прикасаются рукой или подлежащие регулировке вручную ¹ : - металлические - неметаллические	60 75
Шинопровод (для светильников, монтируемых на шинопроводах)	Как указано изготовителем шинопровода ²
Светильник, закрепляемый с помощью штепсельного соединения и вилки ПРА/трансформатора: - детали корпуса, которые монтируются вручную - лицевые поверхности вилки/розетки - все другие детали	75 70 85

Продолжение таблицы 2

<p>(1) Не распространяется на средства регулирования потолочных и встраиваемых светильников. Если инструкции по монтажу содержат четкое руководство по установке светильников вне досягаемости рук, то предельные температуры для средств регулирования не применимы.</p> <p>(2) Условия измерения температуры шинопровода при испытании – по подразделу 12.1 МЭК 60570.</p>
--

Таблица 3 – Допустимые температуры нагрева традиционных материалов, применяемых в светильниках [7]

Деталь	Максимальная температура, °С
Изоляция проводов (провода внутреннего монтажа и внешних проводов), входящих в комплект светильника ^{b)} :	
- стекловолокно, пропитанное силиконовым лаком	200 ^{a)}
- фторопласт	250
- силиконовый каучук (ненапряженный)	200
- силиконовый каучук (напряженный – только на сжатие)	170
- ПВХ обыкновенный	90 ^{a)}
- ПВХ теплостойкий	105 ^{a)}
- сополимер этилена и винилацетата	140 ^{a)}
Изоляция стационарной проводки (как стационарная часть установки, не входящая в комплект светильника) ^{a)} :	
- без защитной оболочки	90 ^{c)}
- с защитной оболочкой, включенной в комплект поставки светильника	120
Термопласты:	
- акрилонитрилбутадиенстирол	95
- ацетобутират целлюлозы	95
- полиметилметакрилат (акриловый)	90
- полистирол	75
- полипропилен	100
- поликарбонат	130
- ПВХ (не используемый для электрической изоляции)	100
- полиамид (нейлон)	120
Термореактивные пластики:	
- фенолформальдегид с минеральным наполнителем	165
- фенолформальдегид с древесным наполнителем	140
- аминопласты	90
- меламин	100
- полиэфир, армированный стекловолокном	130
Прочие материалы:	
- бумага/ткань, пропитанная смолистыми веществами	125
- силиконовый каучук (не используемый для электрической изоляции)	230
- резина (не используемая для электрической изоляции)	70
- дерево, бумага, ткани и т.п.	90

Продолжение таблица 3

- a) Уменьшают на 15 °С при механическом воздействии на изоляцию, например при зажатии или изгибе.
- b) В технических условиях на кабельные изделия обычно указывают широкий диапазон максимальных температур, основанных на результатах эксплуатации, и эти значения предпочтительнее значений, приведенных в таблице.
- c) Температуры, изложенные в настоящей таблице, являются предельно допустимыми в искусственных условиях испытания, например недостаточный воздухообмен в защищенной от сквозняков камере и повышенное по сравнению с нормируемым испытательное напряжение светильника. Следует отметить, что европейские стандарты на светильники и кабельные изделия устанавливают температуру 70 °С как максимальную, которую стационарная проводка с ПВХ изоляцией может выдержать в нормальных условиях эксплуатации.

Опираясь на значение допустимых температур, указанных в таблицах 2 и 3, зададимся максимальной температурой светового прибора равной $T_{СП} = 55\text{ °С}$. С учетом разброса измерений температуры светового прибора $T_{СП\text{макс}} = 60\text{ °С}$.

Глава 2. Используемые методы и методики расчетов и измерений

2.1 Определение общих принципов анализа и расчета тепловых режимов работы светодиодных светильников

2.1.1 Конструкция светодиодного чипа

Светодиод или светоизлучающий диод (СД, СИД, англ. Light-emitting diode, LED) представляет из себя полупроводниковый прибор с электронно-дырочным переходом, создающий оптическое излучение при пропускании через него электрического тока в прямом направлении. Вследствие строения зонной структуры полупроводниковых материалов СД излучают свет в относительно узкой полосе частот (например, для синих светодиодов на основе InGaN ширина спектра на полувысоте составляет порядка 20 нм).

В общем случае существует несколько способов получения белого света среди которых самым эффективным и экономичным является способ получения белого света с помощью кристалла синего СД и желтого (желто-зелёного) люминофора.

Кристалл синего светодиода (на основе InGaN) или, другими словами, «чип» покрывают слоем геля на основе силикона с порошком люминофора так чтобы часть его излучения поглощалась в веществе люминофора и возбуждала его, а часть проходила сквозь люминофор свободно. В результате смешения исходного синего свечения нитрида галлия с желтым свечением люминофора получается белый свет. Сам светодиод при этом изготовлен на базе данного кристалла. В зависимости от технологии сборки в настоящее время различают 4 типа светодиодов:

1. DIP-светодиоды (рисунок 4). Первые светодиоды массового применения появились именно в таком формате. Кристалл помещен в корпус-линзу, которая формирует кривую силы излучения светодиода. Светодиод имеет 2 вывода, короткий вывод «-», длинный вывод «+».

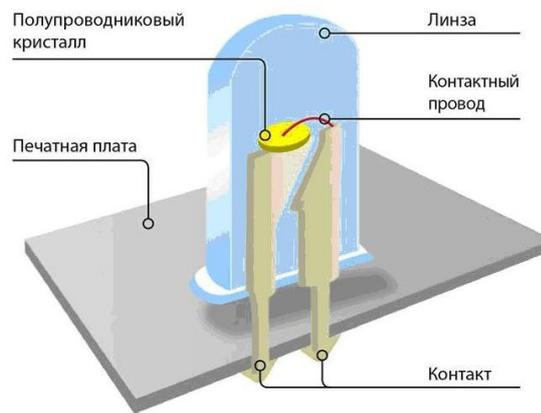


Рисунок 4 – конструкция DIP светодиодов [8]

На сегодняшний день DIP-светодиоды наиболее широко распространены. Однако такой тип светодиодов практически не используется при разработке и конструировании светодиодных светильников. В основном такие источники света находят широкое применение в различных световых табло, подсветках, праздничных световых украшениях.

2. LED – светодиоды или светодиоды типа «пиранья» (рисунок 5).

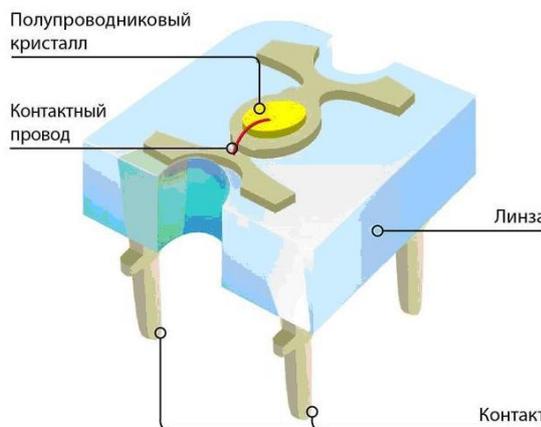


Рисунок 5 – конструкция светодиода типа «пиранья» [8]

Имеют конструкцию аналогичную DIP-светодиодам, но их отличие состоит в наличии 4-х выводов вместо 2-х. Это улучшает теплоотвод и дает большую надежность при монтаже. Данный тип светодиодов широко распространен в автомобильной промышленности. В освещении такие светодиоды сегодня практически не используются вследствие больших

габаритных размеров и неудобства монтажа по сравнению с более современными типами конструкций.

3. SMD-светодиоды (рисунок 6).

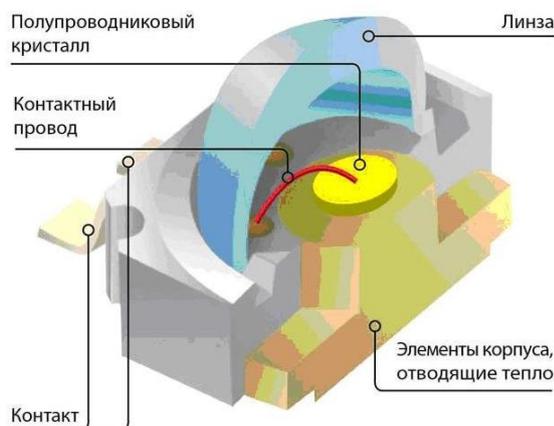


Рисунок 6 – SMD-светодиоды [8]

Светодиоды этого типа изготовлены по технологии поверхностного монтажа (SMT – surface mount technology). Аббревиатура SMD расшифровывается как surface mounted device, т.е. устройства монтируемое на поверхность. Основным отличием этой технологии от «традиционной» технологии сквозного монтажа в отверстия является то, что компоненты монтируются на поверхность платы. Это обеспечивает меньшие габариты конструкции, лучший теплоотвод, вариативность исполнения. Данная конструкция активно применяется при конструировании самых различных световых приборов, предназначенных как для общего, так и для местного освещения.

4. COB-технология (рисунок 7). COB (Chip-On-Board — чип на плате) — технология, при которой чип кристалла монтируется (прикрепляется, впаивается) в плату, и обеспечиваются высочайшие: надёжность (защищённость контакта от окисления), миниатюрность и теплоотвод. Зачастую на плате монтируется сразу несколько чипов, формируя так называемую матрицу светодиодов. COB технология впервые была продемонстрирована в Японии в конце 2000-х годов компаниями Citizen и Sharp.

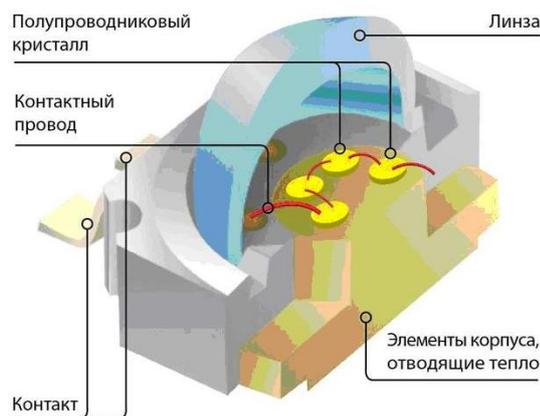


Рисунок 7 – конструкция COB-светодиода [8]

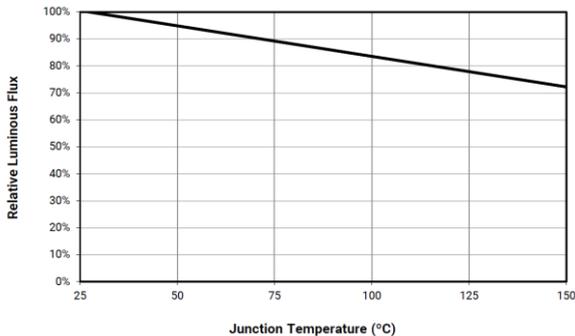
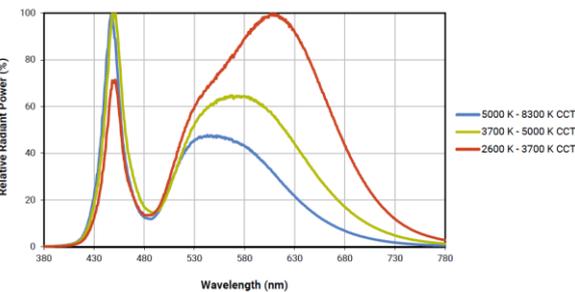
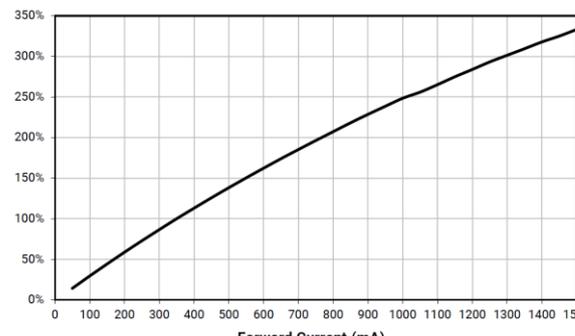
В настоящее время объемы производства светодиодов по COB-технологии составляет порядка 20% от общего объема. Тем не менее COB-технология не может полностью вытеснить SMD, в силу ряда технических ограничений и недостатков. Например, в случае выхода из строя одного из кристаллов в такой матрице светодиодов необходимо полностью заменить всю сборку, в случае же SMD технологии необходимо заменить только один светодиод с вышедшим из строя кристаллом.

При разработке универсального модульного светодиодного светильника было решено использовать SMD-светодиоды компании CREE, серия Xlamp XP-G. Основные параметры и характеристики данных светодиодов приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры и характеристики светодиодов серии Xlamp XP-G [9]

Параметр	Значение	Примечание
Прямой ток, I_f (мА)	350/700/1000	
Прямое напряжение, U_f (В)	2,9/3,05/3,15	При прямом токе $I_f = 350/700/1000$ мА соответственно
Угол излучения °	125	
КСС		

Продолжение таблицы 4

Максимально допустимая температура р-п перехода, T_j °С	150	
Тепловое сопротивление р-п переход-точка припоя R_{j-sp} °С/Вт	4	
Температура сортировки (binning), °С	85	
Зависимость светового потока $I = F(T_j)$ от температуры р-п перехода		
Спектр излучения $I = F(\lambda)$		
Световая характеристика $I = F(I_f)$		

В соответствии с таблицей 1 сортировка (binning) светодиодов осуществлялась при температуре р-п перехода $T_j = 85$ °С. Т.е. указываемые номинальные параметры были определены при температуре р-п перехода $T_j = 85$ °С, следовательно, при анализе тепловых режим работы светодиодного модуля будем использовать значение $T_j = 85$ °С как опорное.

2.1.2 Конструкция алюминиевой печатной платы

Как правило светодиоды монтируются на специальной плате. С помощью платы обеспечивается подвод электроэнергии и передача тепловой энергии корпусу или радиатору (первичный элемент отвода тепла от чипа).

Одним из простейших типов печатной платы, предназначенных для поверхностного монтажа светодиодов является однослойная печатная плата с металлическим основанием (metal core printed circuit board, MCPCB).

Плата (рисунок 8) представляет собой пластину из теплопроводящего материала (обычно алюминия толщиной 0,5...3,2 мм), на которую с помощью стеклоткани пропитанной смолой (препрег), наклеены один или несколько проводящих слоев медной фольги.

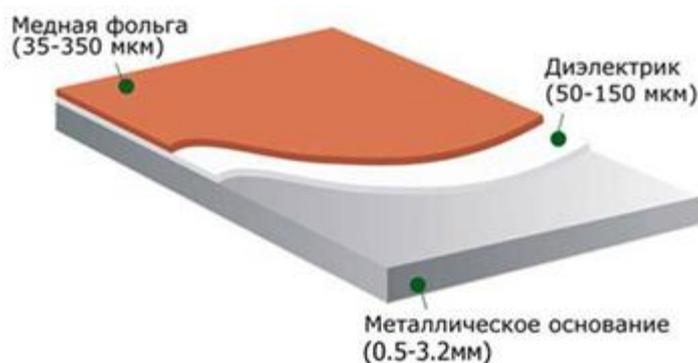


Рисунок 8 – Структура печатной платы

Данный тип плат применяют в изделиях, где имеют место повышенные локальные или распределённые по площади тепловые нагрузки. Генерируемое тепло, легко проходя через диэлектрик, быстро распространяется по всему объёму алюминиевой подложки и далее передается радиатору светового прибора. Материалы печатных плат:

- Медная фольга – используется стандартная для производства печатных плат медная фольга толщиной 35-350 мкм;
- Диэлектрик (препрег) – стеклоткань, пропитанная эпоксидными смолами толщиной 50-150 мкм. В качестве препрега может использоваться как обычная эпоксидная стеклоткань FR-4, так и специальный теплопроводящий состав (T-preg), который обладает лучшими теплопроводными и электроизоляционными свойствами. Он представляет собой специальную химически стойкую структуру с высокой теплопроводностью толщиной 75–200 мкм, изготовленного из особого диэлектрика – смеси полимера со специальной керамикой.

Основные параметры наиболее часто используемых диэлектриков приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Параметры используемых диэлектриков

Параметр	FR-4	T-preg
Теплопроводность, Вт/м · К	0,3	1–5
Диэлектрическая прочность, кВ/мм	20	24–31

- Металлическое основание толщиной 0.5-3.2мм. Наиболее распространенными материалами для металлического основания служат алюминий и медь. Основные тепловые параметры меди и алюминия приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Параметры материалов основания

Параметр	Алюминий	Медь
Коэффициент теплового расширения, $ppm/^\circ C$	24	18
Теплопроводность, Вт/м · К	120-240	390
Плотность, г/см ³	2,7	8,9

Медь обладает лучшими теплопроводными свойствами, однако стоимость алюминия значительно ниже стоимости меди. Теплопроводность наиболее распространённых алюминиевых подложек:

- Алюминий 1100 (аналог АД) – 222 Вт/м · К;
- Алюминий 5052 (аналог Амг2,5) – 138 Вт/м · К;
- Алюминий 6061 (аналог АД33) – 167 Вт/м · К.

В конструкции плат с металлическим основанием важную роль играет коэффициент температурного расширения (КТР) материалов подложки. Использование материалов с большим КТР при высоких температурах приводит к возникновению внутренних механических напряжений. Поэтому для высокотемпературных применений, где данный параметр критичен, используют материалы с подложкой из низкоуглеродистой стали (толщиной 1 и 2,3 мм) с малым КТР.

В соответствии с рекомендацией производителя [10] установка светодиодов серии Xlamp XP-G на печатную плату должна осуществляться

методом оплавления припоя (reflow soldering). Для пайки данным методом рекомендуется использование специальных печей. При мелкосерийном производстве возможно использование нагревательного элемента (электроплитки). Температурные режимы при пайке светодиодов серии Xlamp XR-G указаны на рисунке 9.

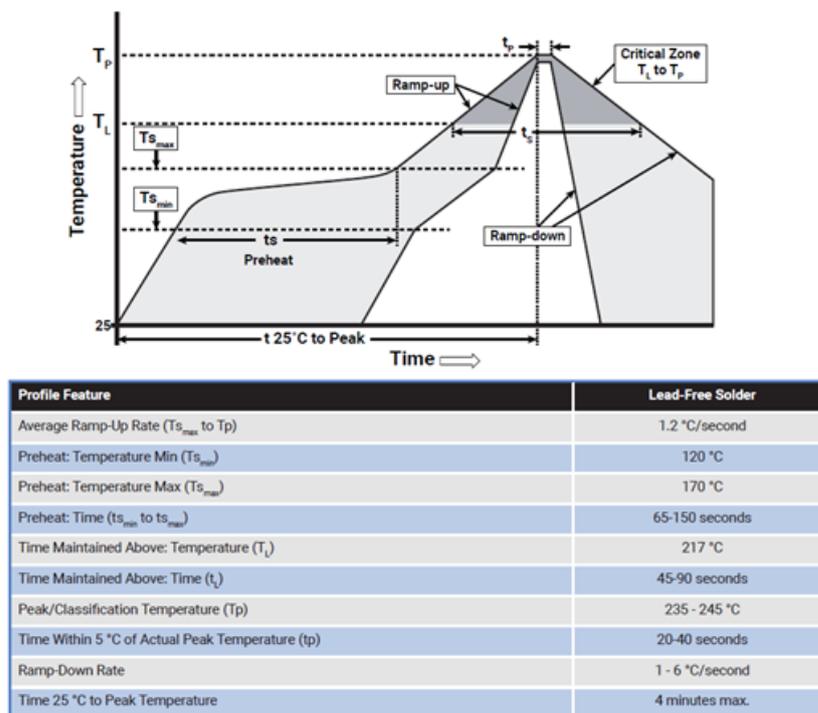


Рисунок 9 – Температурный режим для пайки методом оплавления

Пайка данным методом осуществляется с использованием припойной пасты. Срее рекомендует использовать некоррозионные припойные пасты на основе без свинцовых (Pb-free) припоев: SnAgCu и SnAg [10]. Шаблон трафарета для нанесения припоя приведен на рисунке 10.

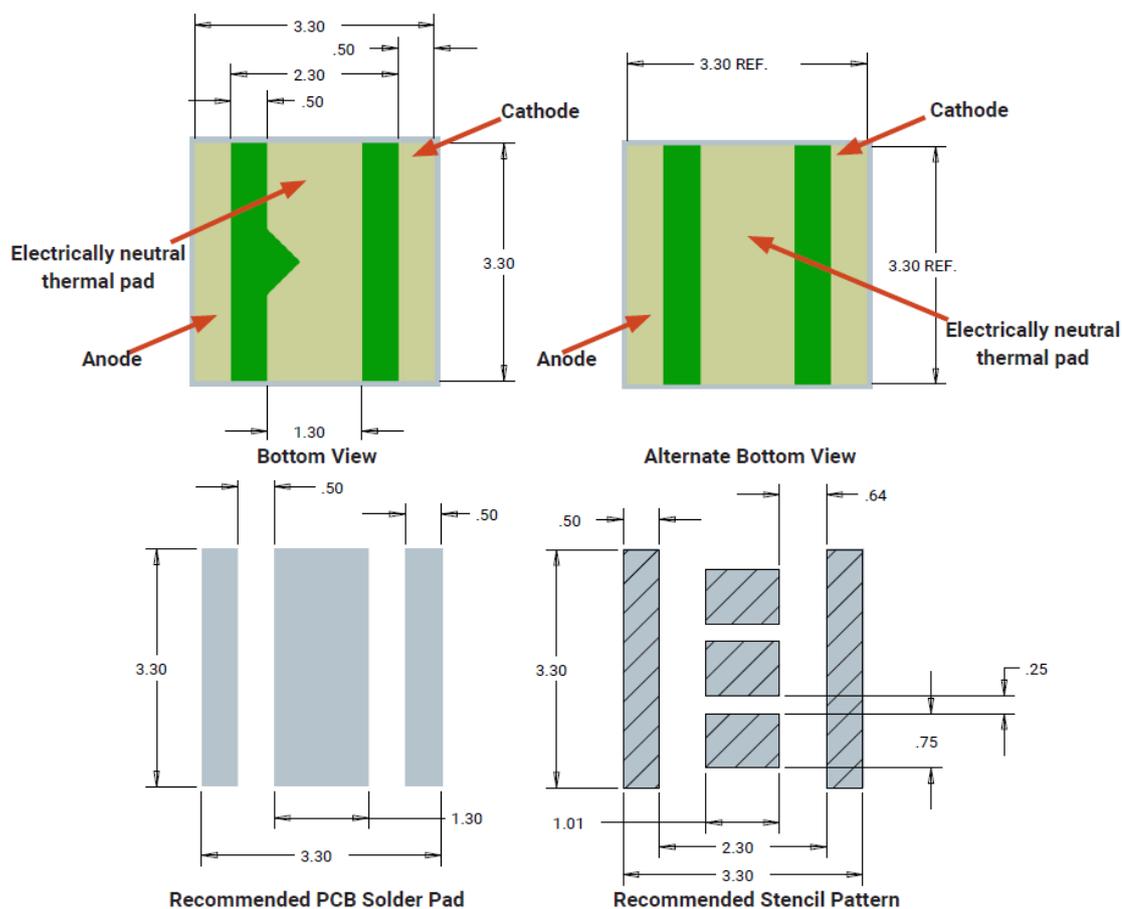


Рисунок 10 – Шаблон трафарета для припоя [9]

Для обеспечения надлежащего качества пайки необходимо использовать автоматическую систему дозировки припойной пасты или специальный трафаретный принтер [10].

2.1.3 Тепловой менеджмент

2.1.3.1 Механизмы передачи тепловой энергии

Главной и наиболее распространенной причиной выхода из строя светодиодов является их некорректный тепловой режим работы. При этом основным и единственным источником тепла в светодиодных светильниках (за исключением световых прибор со встроенным в корпус драйвером) являются сами светодиоды. Данный факт обусловлен тем, что эффективность преобразования светодиодом электрической энергии в световую не равна 100%. Так наиболее высокопроизводительные светодиоды компании CREE способны преобразовывать до 50% процентов электрической энергии в

световую. Отметим, что для обеспечения надежной работы светового прибора в течение всего срока служба будем использовать более консервативный подход, при котором лишь 40% электрической энергии преобразуется в видимое излучения и 60% в тепло. Следовательно, тепловая мощность, которую необходимо рассеять будет определяться по формуле:

$$P_t = 0,6 \cdot U_f \cdot I_f \quad (1)$$

В соответствии с данными, указанными производителем, получим:

- $I_f = 350$ (мА), $U_f = 2,9$ (В), $P_t = 0,6 \cdot 0,35 \cdot 2,9 = 0,61$ (Вт);
- $I_f = 700$ (мА), $U_f = 3,05$ (В), $P_t = 0,6 \cdot 0,7 \cdot 3,05 = 1,3$ (Вт);
- $I_f = 1000$ (мА), $U_f = 3,15$ (В), $P_t = 0,6 \cdot 1 \cdot 3,15 = 1,89$ (Вт).

Светодиод передает выделившуюся тепловую энергию окружающему пространству следующими тремя способами:

1. Теплопроводность – механизм передачи тепла от более нагретых участков твердого тела к менее нагретым. В соответствии с законом Фурье передаваемую тепловую мощность, по средствам теплопроводности, можно определить по формуле:

$$Q_{cond} = -k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2)$$

где Q_{cond} [Вт] – количества тепла, передаваемого посредством теплопроводности;

k [Вт/мК°] – коэффициент теплопроводности данного материала;

A [м²] – площадь поперечного сечения, через которое распространяется тепло;

ΔT [°C] – градиент температуры;

Δx [м] – расстояние, преодолеваемое тепловым фронтом.

2. Конвекция – явление переноса теплоты в жидкостях, газах или сыпучих средах потоками самого вещества. Выделяют естественную и вынужденную(принудительную) конвекцию.

Естественная конвекция возникает в веществе самопроизвольно при его неравномерном нагревании в поле тяготения. При такой конвекции нижние

слои вещества нагреваются, становятся легче и всплывают, а верхние слои, наоборот, остывают, становятся тяжелее и опускаются вниз.

При вынужденной (принудительной) конвекции перемещение вещества обусловлено действием внешних сил (насос, лопасти вентилятора и т. п.). Она применяется, когда естественная конвекция является недостаточно эффективной.

Тепловая мощность, передаваемая за счет конвекции, определяется в соответствии с законом охлаждения Ньютона по формуле:

$$Q_{conv} = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (3)$$

где Q_{conv} [Вт] – количества тепла, передаваемого посредством конвекции;

h [Вт/м²К°] – коэффициент теплоотдачи;

A [м²] – площадь поверхности;

ΔT [°С] – градиент температуры (разница между температурой поверхности и температурой окружающего воздуха).

3. Тепловое излучение – электромагнитное излучение, испускаемое телами за счёт их внутренней энергии. Количество тепла передаваемого за счет теплового излучения определяется излучательной способностью данного тела. Причем в соответствии с законом Кирхгофа излучательная способность тела тем выше, чем выше его поглотительная способность. Количество тепла передаваемого за счет теплового излучения определяется по формуле:

$$Q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_s^4 - T_f^4) \quad (4)$$

где Q_{rad} [Вт] – количества тепла, передаваемого посредством теплового излучения;

ε – коэффициент излучательной способности данного тела;

σ [Вт/м²К⁴] – постоянная Стефана-Больцмана;

A [м²] – площадь поверхности;

T_s [°С] – температура излучающей поверхности;

T_f [°С] – температура окружающего воздуха.

Конструкция светильника предполагает, что светодиоды будут расположены во внутренней полости, изолированной от окружающей среды. Таким образом основным механизмом передачи тепловой энергии от светодиода окружающему пространству является теплопроводность в твердых телах. Это обусловлено следующими факторами:

- В замкнутом пространстве практически полностью отсутствует конвекция;
- Внутренняя полость и стенки светильника прогревается практически до такой же температуры что и сам корпус светодиода, кроме этого, малая площадь поверхности светодиода приводят к тому, что количество тепла передаваемого за счет теплового излучения близко к нулю.

Следовательно, практически все тепло генерируемого светодиодом передается через область припоя и область тепловой подушки алюминиевой печатной плате и далее радиатору светового прибора.

2.1.3.2 Тепловая модель

Для анализа и оценки температуры р-п перехода в светодиодной промышленности используется тепловая модель аналогичная электрической цепи. В этом случае система, состоящая из светодиода, печатной платы и радиатора может быть представлена в виде резистивной электрической цепи.

Для такого подхода:

- Тепловое сопротивление каждого элемента представлено в виде резисторов;
- Тепловой поток – аналог электрического тока;
- Температура – аналог электрического потенциала (напряжения).

На рисунке 11 представлена схема тепловой модели светового прибора в виде аналога электрической цепи.

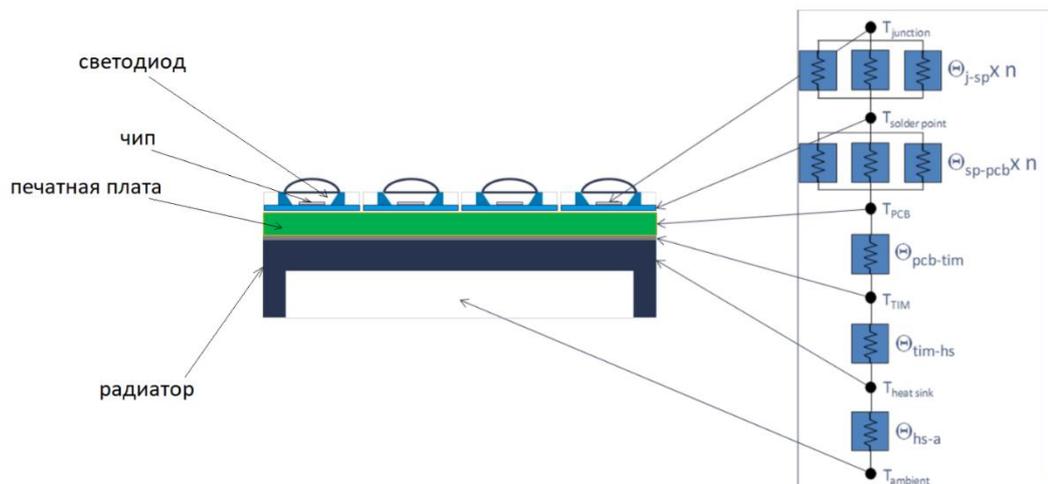


Рисунок 11 – Схема тепловой модели светового прибора [11]

Используемые обозначения:

- $T_{junction}$ – температура р-п перехода;
- $T_{solder\ point}$ – температура точки припоя;
- T_{PCB} – температура печатной платы;
- T_{TIM} – температура термоинтерфейса;
- $T_{heat\ sink}$ – температура радиатора;
- $T_{ambient}$ – температура окружающей среды;
- θ_{j-sp} – тепловое сопротивление перехода р-п переход – точка припоя;
- θ_{sp-PCB} – тепловое сопротивление перехода точка припоя – печатная плата;
- $\theta_{PCB-TIM}$ – тепловое сопротивление перехода печатная плата – термоинтерфейс;
- θ_{TIM-hs} – тепловое сопротивление перехода термоинтерфейс – радиатор;
- θ_{hs-a} – тепловое сопротивление перехода радиатор – окружающая среда;
- n – количество светодиодов.

Тепловое сопротивление каждого элемента может быть рассчитано по формуле:

$$\theta_{a-b} = \frac{T_a - T_b}{P_t} \quad (5)$$

где θ_{a-b} – тепловое сопротивление между точками «а» и «b» (°C/Вт);

T_a – температура в точка «а» (°C);

T_b – температура в точка «b» (°C);

P_t – тепловая мощность (Вт).

В свою очередь тепловое сопротивление всей системы равно сумме тепловых сопротивлений элементов составляющих данную систему:

$$\theta_{sys,a-z} = \theta_{a-b} + \theta_{b-c} + \dots + \theta_{y-z} \quad (6)$$

Используя данную тепловую модель, определим температуру р-п перехода

$$T_j = T_{sp} + \theta_{led} P_{total} \quad (7)$$

где T_j – температура р-п перехода;

T_{sp} – температура точки припоя;

$\theta_{led} = 4 \text{ °C/Вт}[9]$ – тепловое сопротивление светодиода;

$P_{total} = I_f U_f$ – полная электрическая мощность светодиода;

Предполагая, что температура точки припоя равна заданной температуре светового прибора $T_{sp} = T_{СП} = 55^\circ\text{C}$, получим

При $I_f = 350 \text{ мА}$

$$T_j = 55 + 4 \cdot 0,35 \cdot 2,9 = 59,1^\circ\text{C} \quad (64,1^\circ\text{C, при } T_{СП} = 60^\circ\text{C})$$

При $I_f = 700 \text{ мА}$

$$T_j = 55 + 4 \cdot 0,7 \cdot 3,05 = 63,54^\circ\text{C} \quad (68,54^\circ\text{C, при } T_{СП} = 60^\circ\text{C})$$

При $I_f = 1000 \text{ мА}$

$$T_j = 55 + 4 \cdot 1 \cdot 3,15 = 67,6^\circ\text{C} \quad (72,6^\circ\text{C, при } T_{СП} = 60^\circ\text{C})$$

Для обеспечения высокой надежности светового прибора ограничим прямой ток светодиода до 1000 мА.

2.2 Прототипирование

В настоящей работе разработан макет светильника, с помощью которого проведен анализ тепловых режимов. Измерение температуры разработанного макета осуществлялось измерителем температуры с помощью хромель-алюмелевой термопары, которая располагалась в непосредственной близости от светодиода.

Электропитание обеспечивал источник от компании GW Instek серии GPC-76030D (Рисунок 12). Основные технические характеристики GPC-76030D приведены в таблице 7.



Рисунок 12 – Внешний вид источника питания GW Instek GPC-76030D [12]

Таблица 7 – Технические характеристики источника питания GPC-76030D [13]

Параметр	Значение
РЕЖИМЫ РАБОТЫ	
Независимый	Два регулируемых выхода и один фиксированный (5 В/3 А).
	Выходное напряжение (0...60x2max)В, выходной ток (0...3x2max)А
Последовательный	Один регулируемый выход и один фиксированный (5 В/3 А).
	Вых. напряжение (0... 120max)В, вых. ток (0...3max)А
Параллельный	Один регулируемый выход и один фиксированный (5 В/3 А).
	Вых. напряжение (0... 60max)В, вых. ток (0... 6max)

Продолжение таблицы 7

СТАБИЛИЗАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЯ	
Нестабильность	$\leq 0,01 \% + 3 \text{ мВ}$ при изменении напряжения питания
	$\leq 0,01 \% + 3 \text{ мВ} (< 3 \text{ А}), \leq 0,02 \% + 5 \text{ мВ} (\geq 3 \text{ А})$ при изм тока нагр.
Уровень пульсаций и шум	$\leq 1 \text{ мВ ср. кв.}$ в диапазоне 5 Гц...1 МГц
Время установления	$\leq 100 \text{ мкс}$ (50 %-изменение нагрузки, мин. ток 0,5 А)
СТАБИЛИЗАЦИЯ ТОКА	
Нестабильность	$\leq 0,2 \% + 3 \text{ мА}$ при изменении напр. питания и напр. на нагрузке
Уровень пульсаций	$\leq 3 \text{ мА ср. кв.}$
АВТОТРЕКИНГ	
Погрешность трекинга	$\leq (0,5 \% + 10 \text{ мВ})$ от показаний ведущего источника
Погрешность послед. соединения	$\leq 300 \text{ мВ}$
ЦИФРОВОЙ ИНДИКАТОР	
Формат индикации	3 разряда, СД-индикаторы
Дискретность индикации	10 мВ ($U_{\text{max}} \leq 18 \text{ В}$), 100 мВ ($U_{\text{max}} \leq 180 \text{ В}$) 10 мА
Погрешность измерения	$\pm (0,5 \% + 2 \text{ ед.})$
Количество индикаторов	2 (совмещённые вольтметр/амперметр)
ИСТОЧНИК ФИКСИРОВАННОГО НАПРЯЖЕНИЯ 5В	
Выходные параметры	5 В $\pm 0,25 \text{ В}$ / 3 А
Нестабильность	$\leq 5 \text{ мВ}$ при изменении напряжения питания
	$\leq 10 \text{ мВ}$ при изменении тока нагрузки
Уровень пульсаций	$\leq 2 \text{ мВ ср. кв.}$
ИЗОЛЯЦИЯ	
Корпус – выход	$\geq 20 \text{ МОм}$ (500 В)
Корпус – сеть	$\geq 30 \text{ МОм}$ (500 В)
ОБЩИЕ ДАННЫЕ	
Напряжение питания	100 В/120 В/220 В/240 В $\pm 10 \%$, 50/60 Гц
Габаритные размеры (ШхВхГ)	255 × 145 × 420 мм
Масса	18,5 кг

Анализ тепловых режимов работы светильника проводился в помещении при отсутствии принудительной вентиляции (все окна и двери закрыты). В ходе проведения измерений светильник выдерживался не менее 30 минут в каждом из заданных режимов, что необходимо для стабилизации температуры.

2.3 Моделирование тепловых режимов работы светильника в программном комплексе «Solid works 3D CAD /Solid works Flow simulation»

1. SOLIDWORKS 3D CAD [14]

Данное программное обеспечение представляет собой широко известную систему автоматизированного проектирования (CAD систему). SOLIDWORKS 3D CAD предоставляет инженерам, проектировщикам и производителям простые в освоении и мощные функциональные возможности для проектирования изделий.

2. SOLIDWORKS Flow Simulation [15]

SolidWorks Flow Simulation – является добавлением в среду проектирования Solidworks 3D CAD и представляет собой мощное решение вычислительной гидродинамики (CFD). С помощью flow simulation становится возможным быстро и просто смоделировать эффекты потока теплообмена и гидродинамических сил. Кроме того, данное добавление позволяет моделировать потоки жидкости и газа в реальных условиях и эффективно анализировать последствия потока жидкости, теплообмена и связанных сил, действующих на компоненты и проходящих через них. В решении также можно быстро сравнивать варианты проекта, чтобы оптимизировать принятие решений и производить более эффективные изделия.

Преимущества:

- Оценка производительности изделия при быстром изменении нескольких переменных.
- Ускорение вывода на рынок благодаря быстрому определению оптимальных решений проекта и сокращению количества физических прототипов.
- Снижение себестоимости благодаря сокращению количества переделок и улучшению качества.
- Повышение точности предложений.

Таблица 8 – Основные возможности Flow simulation [16]

Взаимодействие с приложениями SOLIDWORKS для проектирования	Работа в среде SOLIDWORKS 3D CAD; Поддержка конфигураций и материалов SOLIDWORKS; Справочная документация; База знаний; Инженерная база данных Вывод результатов из SOLIDWORKS Simulation в eDrawings®
Общий анализ потока	2D-поток 3D-поток Симметрия Расчет вращающихся объектов Внутренние потоки Внешние потоки
Типы анализа	Устойчивое состояние и промежуточные потоки жидкости Жидкости Газы Неньютоновские жидкости Смешанные жидкости Потоки сжимаемого газа и несжимаемых жидкостей Дозвуковой, околозвуковой и сверхзвуковой поток газа
Инструмент создания сетки	Автоматические и ручные параметры глобальной сетки Локальная детализация сетки
Общие возможности	Потоки жидкости и теплообмен в пористых средах Потоки неньютоновских жидкостей Потоки сжимаемых жидкостей Неидеальные газы Свободная, принудительная и смешанная конвекция Потоки жидкости с пограничными слоями, включая эффекты шероховатости стенок Ламинарные и турбулентные потоки Только ламинарный поток Смешанные жидкости и многокомпонентные твердые тела Потоки в моделях с подвижными/вращающимися поверхностями и/или деталями Перенос тепла в жидких, твердых и пористых средах с сопряженным теплообменом и без него и/или с жаростойким контактом между твердыми телами Перенос тепла только в твердых телах Эффекты гравитации
Расширенные возможности	Прогнозирование шума (в стационарном и переходном состоянии) Свободная поверхность Теплообмен излучением между твердыми телами Источники тепла с эффектом Пельтье Поток излучения на поверхностях полупрозрачных тел Джоулев нагрев под прямым электрическим током в электропроводящих твердых телах Различные типы теплопроводности в твердотельном носителе Кавитация в несжимаемых потоках жидкости Равнообъемная конденсация воды из пара и ее влияние на поток и теплообмен Относительная влажность в газах и газовых смесях Двухфазовые потоки (жидкость + частицы) Периодические граничные условия Расчет трасс Параметры комфорта Тепловые трубы Термические соединения Двухрезисторные компоненты Печатные платы Термоэлектрические охладители

Глава 5. Области применения разрабатываемого светового прибора

Согласно технического задания данный световой прибор разработан для освещения складов ангарного типа стеллажного хранения. Однако возможность варьирования мощности в широких пределах могут значительно расширить области применения данного СП.

Среди множества областей применения выделим следующие наиболее подходящие области, для которых разработанная конструкция светового прибора подходит наилучшим образом:

- Производственные помещения ангарного типа;
- Спортивные площадки закрытого типа;
- Торговые залы универсамов и гипермаркетов.

Необходимо также отметить, что наиболее эффективно корпус СП отводит тепло от светодиодов в случае крепления последнего на тросах при помощи рым-болтов или винтов с кольцом. В таком случае световой прибор возможно расположить на достаточном расстоянии от потолка и тем самым обеспечить максимально-эффективное обтекание СП воздушным потоком.

Конструкция СП не предусматривает возможности встраивания данного светильника в подвесные потолки типа армстронг, грильято. При проектировании офисного освещения СП возможно использовать в зонах где необходимо обеспечить местное освещение (путем подвеса СП на тросах) или в случае высоких потолков (путем подвеса СП на тросах).

Разработанный СП также возможно использовать для уличного освещения площадей, парковок. Однако конструкция СП предполагает наличие двух плавников, образующих нишу в центре светильника, что может привести к скоплению влаги и пыли, что в свою очередь может привести к быстрому выходу из строя светового прибора.

Глава 6. Концепция стартап-проекта

6.1 Название

Идея проекта заключается в разработке и создании промышленного линейного светильника с улучшенной системой теплоотвода и малым весом, удовлетворяющего запросы потребителей в области осветительных систем промышленного освещения.

Цель проекта – разработка маркетингового плана продвижения предлагаемой разработки (промышленного светильника) среди потенциальных клиентов на российский рынок.

Опираясь на разрабатываемое решение, было предложено следующие название для стартап-проекта: «Модульный линейный промышленный светильник-радиатор»

Предлагаемое коммерческое название светильника:

«MODULE LINE INDUSTRIAL».

6.1 Основные качества продукта, решаемая продуктом проблема

В период активного развития производства при разработке производственных цехов ангарного типа, современных логистических центров, одна из ключевых проблем которую необходимо решить является обеспечение надлежащего освещения. Решить данную проблему (боль) призвана наша разработка универсального, светодиодного, модульного, линейного светильника.

Данный световой прибор обладает улучшенной системой теплоотвода обеспечивающей надлежащий режим работы при температурах окружающей среды до +35 °С.

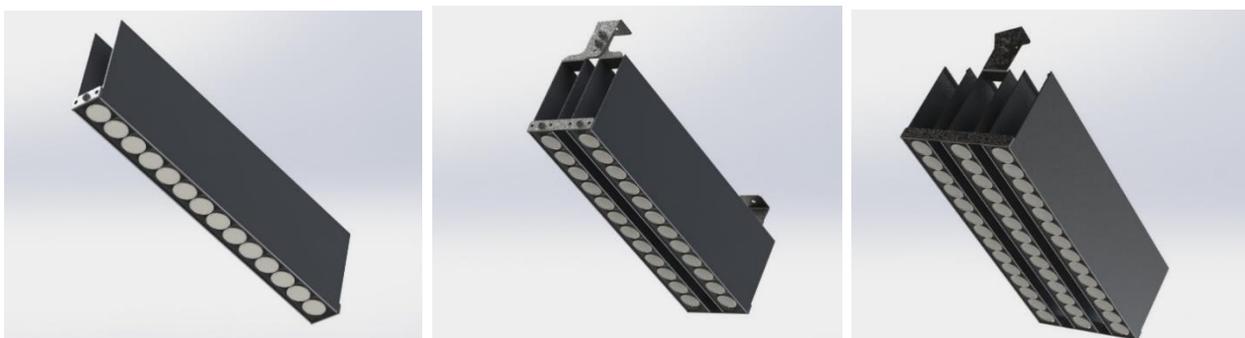


Рисунок 64 – Возможные конфигурации предлагаемого светильника

Универсальность и модульность заключается в возможности комбинирование модулей (рисунок 64) для получения большего светового потока. Малый вес светового прибора позволяет устанавливать световой прибор на так называемые обслуживающие мостики и другие конструкции с ограниченной грузоподъемностью.

6.2 Защита интеллектуальной собственности

Для защиты интеллектуальной собственности в соответствии с законом необходимо направить заявку в Федеральную службу по интеллектуальной собственности (Роспатент), дождаться получения патента, после чего алгоритм будет регулироваться сразу несколькими актами - частью четвертой Гражданского кодекса Российской Федерации, а также федеральными законами № 98-ФЗ от 29 июля 2004 года «О коммерческой тайне», № 149-ФЗ от 27 июля 2006 года «Об информации, информационных технологиях и о защите информации», № 135-ФЗ от 26 июля 2006 года «О защите конкуренции», а также Кодексом об административных правонарушениях РФ, Уголовным кодексом РФ и другими.

6.3 Объем и емкость рынка

Согласно данным анализа технологического потенциала светотехнической промышленности в Российской Федерации проведенного ООО «Лайтинг

Бизнес Консалтинг» [21] емкость рынка светодиодных светильников на 2015 год составляет:

- Общая емкость рынка осветительных приборов на 2015 год – 47 395 млн. рублей;
- Доля промышленного освещения: 21,9%. Тогда емкость рынка светильников для промышленного освещения – 10 379,505 млн. руб.
- Общая емкость рынка светодиодных осветительных приборов в сравнении с традиционными источниками света на 2015 год – 53%;
- Тогда емкость рынка светодиодных светильников для промышленного освещения – 5 501,14 млн. руб.

Средний темп роста рынка светодиодных светильников в год составляет порядка 5% [22,23]. Тогда предполагаемая емкость рынка промышленных светодиодных светильников на 2020 год составит – 7021,004 млн рублей.

6.4 Анализ современного состояния и перспектив отрасли

Одним из трендов развития светодиодной светотехники на 2019 год является создание изделий на основе мощных светодиодов и их постоянное совершенствование и удешевление, среди которых можно выделить световые приборы мощностью $P > 150$ Вт. Основные проблемы при создании мощных светильников состоят в требованиях, предъявляемых к их конструкции, теплоотводу, светотехническим параметрам, которые определяются их назначением и условиями эксплуатации. При этом широкое применение светодиодных установок большой мощности на данный момент остается ограниченным, вследствие сохранения высокой стоимости конечной осветительной установки. Одним из способов решения данной проблемы и удешевления стоимости конечной осветительной установки является разработка универсального модульного светодиодного светильника-радиатора с эффективной системой теплоотвода и вторичной оптикой, обеспечивающей требуемое распределение света.

6.5 Расчет себестоимости продукта

Определим ежемесячный и годовой объемы производства:

- Время сборки одного модуля (не светильника) составляет 5 минут.
- Длительность рабочего дня: 8 часов (480 минут), одна смена
- Ежемесячный объем производства: 1600-2200 модулей (в зависимости от количества рабочих дней в месяце)
- Количество рабочих дней в 2020 году: 248 дней
- Годовой объем производства на 2020 год: 23808 модулей

Расчет себестоимости продукта проведем, исходя из расходов на разрабатываемый продукт. Используем следующую группировку по статьям затрат:

- материальные затраты;
- затраты на оборудование;
- Заработная плата;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

6.5.1 Материальные затраты

Стоимость материальных затрат необходимых для изготовления одного модуля длиной 400 мм приведены в таблице 16.

Таблица 16 – Стоимость материальных затрат

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за единицу, руб.	З _м , руб.
Стальной лист оцинкованный толщиной 1,5 мм	м ²	0,0013	700	0,88
Органическое стекло толщиной 1 мм	м ²	0,01456	500	7,28
Шнур силиконовый, диаметром 1 мм	м	1,8	2	3,6
Паяльная паста	г	6	3,3	19,8
Припой проволочный	г	5	2,4	12
Итого				43,56

6.5.2 Затраты на оборудование

Стоимость оборудования, используемого при производстве светильника учитывается в калькуляции в виде амортизационных отчислений. Затраты на используемое оборудование приведены в таблице 17.

Амортизационные отчисления на оборудование, определяются по формуле

$$A_{\text{в год}} = \frac{C}{T} \quad (9)$$

где C – стоимость единицы оборудования, тыс. руб.

T – срок эксплуатации, лет

Таблица 17 – Затраты на используемое оборудование

№	Наименование оборудования	Кол-во	Цена ед., тыс. руб.	Σ стоимость, тыс. руб.	T, лет	A _{в год} тыс. руб.	A _{в месяц} тыс. руб.
1	Графариетный принтер SR-2000	1	70	70	5	14,0	1,17
2	Термостол термопро нп 34-24	1	74	74	5	14,8	1,23
3	Пила для резки алюминиевого профиля	1	214	214	5	42,8	3,57
Итого амортизация в месяц							5,97

6.5.3 Контрагентные расходы

Расходы необходимые для изготовления одного модуля длиной 400 мм, связанные с выполнением работ сторонними организациями приведены в таблице 18.

Таблица 18 – Контрагентные расходы

№	Наименование услуги	Стоимость за единицу	Количество	Стоимость работ, руб.
1	Раскрой металла на лазерном станке, сталь до 3 мм	50 (р/метр реза)	0,136 м – глухая сторона 0,152 м – сторона с выводом	14,43
2	Раскрой органического стекла, до 4 мм	25 (р/метр реза)	0,874	21,85
3	Изготовление алюминиевого профиля	363,35 (погонный метр)	0,4	145,34

Продолжение таблицы 18

4	Изготовление силиконовых прокладок	8	2	16
5	Изготовление корпусов линз	10	12	120
6	Изготовление линз	26	12	312
7	Изготовление печатных плат	500	1	500
8	Изготовление светодиодов Cree XP-G2	100	12	1080
ИТОГО				2080

Для запуска производства также необходимо осуществить единовременные выплаты в размере:

Изготовление инструмента для алюминиевого профиля – 100 000 руб.

Изготовление пресс-формы для силиконовых прокладок – 60 000 руб.

Изготовление оснастки для линз – 250 000 руб.

Изготовление оснастки для корпусов – 125 000 руб.

Общий размер единовременных выплат составляет – 535 000 руб.

6.5.3 Основная заработная плата сборщиков начальника цеха

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.). Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп.}} = K_{\text{доп.}} \cdot Z_{\text{осн.}} \quad (10)$$

где $K_{\text{доп.}} = 0,15$ – коэффициент дополнительной заработной платы

Страховые взносы во внебюджетные фонды отражают обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации

нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников. Величина страховых взносов во внебюджетные фонды определяется по формуле:

$$З_{\text{внеб.}} = K_{\text{внеб.}} \cdot (З_{\text{осн.}} + З_{\text{доп.}}) \quad (11)$$

$K_{\text{внеб.}} = 30,2\%$ – Коэффициент страховых взносов во внебюджетные фонды
Суммарные затраты на заработную плату сборщиков приведены в таблице 19.

Таблица 19 – Расчет основной заработной платы

	Сборщик 1	Сборщик 2	Инженер светотехник	Пайщик (ручная пайка)	Пайщик (на станке)
Основная заработная плата (оклад), руб.	25000	25000	30000	25000	30000
Дополнительная заработная плата, руб.	3750	3750	4500	3750	4500
Коэффициент страховых взносов во внебюджетные фонды	30,2%				
Величина страховых взносов во внебюджетные фонды	8682,5	8682,5	10419	8682,5	10419
Итого, в месяц, руб.	37432,5	37432,5	44919	37432,5	44919
Итого, руб.	202135,5				

Примем накладные расходы в размере 30% от фонда оплаты труда – 60640,65 руб.

Расчетная величина себестоимости изготовления одного модуля при ежемесячном объеме производства 2000 модулей приведена в таблице 20.

Таблица 20 – Себестоимость изготовления одного модуля

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальны затраты	44
2. Затраты на оборудование	3
3. Затраты по заработной плате	102
4. Контрагентные расходы	2080
5. Накладные расходы	32
Итого	2261

На основе проведенных расчетов для изготовления одиночного модуля сформируем сетку себестоимости для возможных модификаций светильника (таблица 21).

Таблица 21 – Себестоимость изготовления различных модификаций светильника

Количество модулей	Габариты СП (ДШВ)	количество печатных плат	Полная потребляемая мощность светильника, Вт	Общий световой поток, лм (светодиоды XP-G)	Себестоимость
1 модуль	407,5x40x117	1 плата	40	3760	2261
	807,5x40x117	2 платы	80	7520	4522
	1207,5x40x117	3 платы	120	11280	6783
	1607,5x40x117	4 платы	160	15040	9044
	2007,5x40x117	5 плат	200	18800	11305
2 модуля	407,5x100x117	1 плата	80	7520	4522
	807,5x100x117	2 платы	160	15040	9044
	1207,5x100x117	3 платы	239	22466	13566
	1607,5x100x117	4 платы	319	29986	18088
	2007,5x100x117	5 плат	399	37506	22610
3 модуля	407,5x160x117	1 плата	120	11280	6783
	807,5x160x117	2 платы	239	22466	13566
	1207,5x160x117	3 платы	359	33746	20349
	1607,5x160x117	4 платы	479	45026	27132
	2007,5x160x117	5 плат	599	56306	33915
4 модуля	407,5x220x117	1 плата	160	15040	9044
	807,5x220x117	2 платы	319	29986	18088
	1207,5x220x117	3 платы	479	45026	27132
	1607,5x220x117	4 платы	638	59972	36176
	2007,5x220x117	5 плат	798	75012	45220
5 модулей	407,5x280x117	1 плата	200	18800	11305
	807,5x280x117	2 платы	399	37506	22610
	1207,5x280x117	3 платы	599	56306	33915
	1607,5x280x117	4 платы	798	75012	45220
	2007,5x280x117	5 плат	998	93812	56525

6.6 Конкурентные преимущества продукта и обзор технико-экономических характеристик аналогов

Полученная система обладает следующими преимуществами:

- Применение одинаковых, отдельных модулей, что удешевляет процесс изготовления и позволяет набирать требуемое количество модулей для создания необходимого уровня освещенности. Возможность варьирования мощности от 40 до 1000 Вт;
- Более эффективное охлаждение, за счет улучшенной циркуляции воздуха;
- Малый вес и габариты единичного модуля. Так для единичного модуля длиной 0,5 м при мощности 100 Вт/м вес составляет ~ 1 кг.

Примеры аналогичных систем освещения, предлагаемые российскими производителями:

- «LEDEL»: промышленные светильники серии «L-lego II»
- «Световые технологии»: промышленные светильники серии «НВ LED»
- «DURAY»: промышленные светильники серии «Енисей»
- «MasterLED»: промышленные светильники серии «ДПП»

Таблица 22 – Сравнение с аналогами

	«DURAY»:Енисей 120.34110.222	«LEDEL»: L- lego II 250	«MasterLED»: ДПП-210-33000-5	Предлагаемая разработка
Мощность, Вт	222	225	210	240
Световой поток	34110 (светодиоды 200 лм/Вт)	29252	28917	22466 (светодиоды 110 лм/Вт) 28680 (светодиоды 140 лм/Вт)
Индекс цветопередачи	>75	>80	>80	>80
IP	67	66	65	65
Масса, кг	8,7	8,7	6,0	4,8
Габаритные размеры, мм	550x350x65	329x212x191	464x304x202	807,5x160x117
Типы крепления	Консольное, подвес на тросах	Подвес на тросах	Консольное	Консольное, подвес на тросах
Стоимость одного светильника, руб.	32490	50600	13692	X

Проанализировав основные параметры предлагаемых решений различными производителями светодиодной светотехники, можно заключить следующее:

- К преимуществам предлагаемой разработки можно отнести: малый вес, надежность за счет, проведенный оптимизации тепловых режимов работы, относительно невысокая себестоимость при учете малых объемов производства;
- Средняя цена на рынке светодиодного промышленного светильника мощностью 220 Вт составляет 30 тыс. рублей.

Необходимо также учитывать, что такие производители как «LEDEL», «MasterLED», «DURAY» известны потребителю, а предлагаемые ими решения зарекомендовали себя на рынке.

Таким образом планируемая стоимость продукта в данной модификации, мощностью 239 Вт будет составлять – 16 279 рублей, при закладываемой норме прибыли в 20%.

6.7 Бюджет проекта, период окупаемости

Учитывая годовой объем производства в 23808 штук и закладываемую норму прибыли в 20% определим период окупаемости проекта (таблица 23).

Таблица 23 – Бюджет проекта

Наименование статьи	Сумма, руб.
Размер стартовых капиталовложений(единовременные выплаты + накладные расходы в год + стоимость оборудования)	1 620 687,80
Постоянные расходы в месяц (ФОТ + накладные расходы + амортизационные отчисления в месяц)	268 746,15
Переменные издержки на единицу продукции	2 124,00
Цена единицы изделия	2 713,20
Выручка, в год	64 595 865,60
Прибыль до налогообложения	10 765 977,60
Прибыль после налогообложения	8 612 782,08

Тогда период окупаемости проекта

$$T = \frac{1\,620\,687,80}{8\,612\,782,08} = 0,19 \text{ лет} = 70 \text{ дней}$$

Исходя из полученных данных определим точку безубыточности как минимальное количество модулей, которое необходимо произвести в месяц чтобы покрыть расходы (рисунок 65).

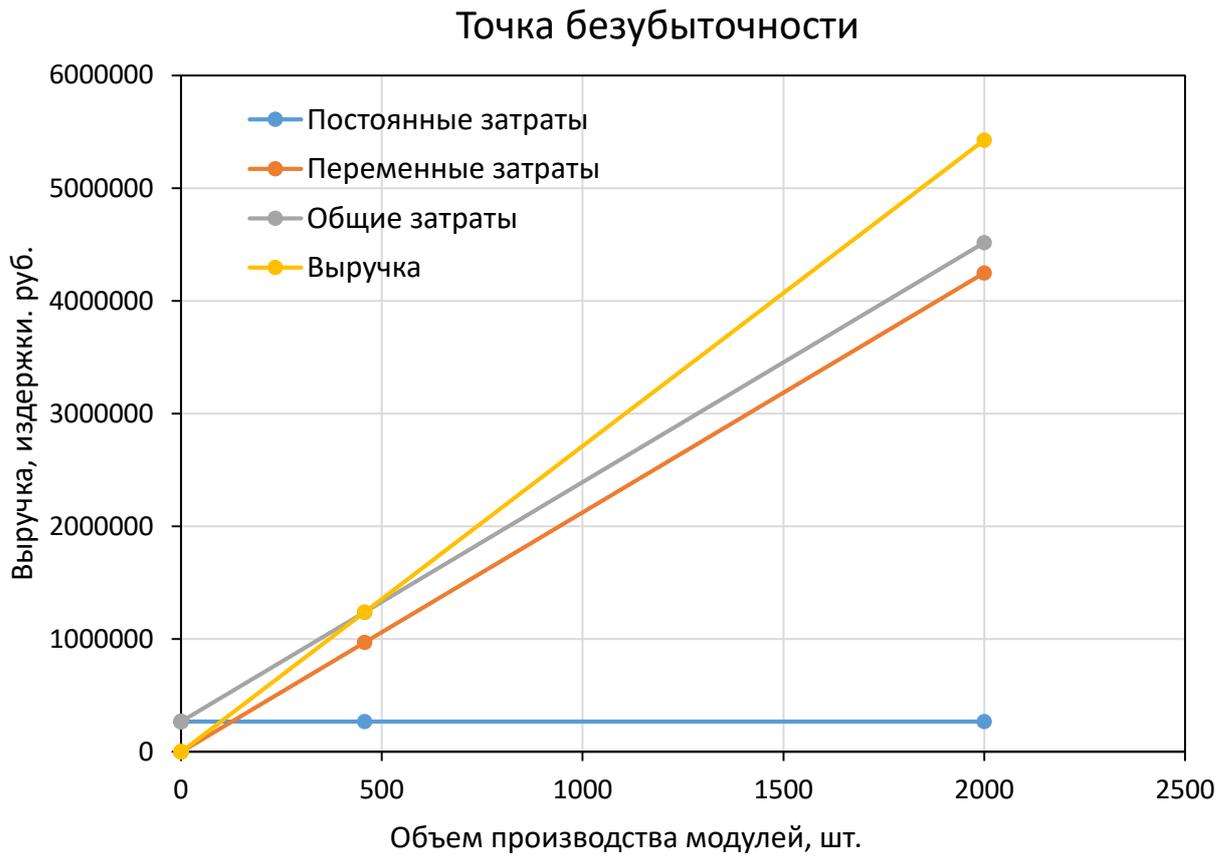


Рисунок 65 – Точка безубыточности

Точка безубыточности =

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\text{постоянные расходы}}{\text{цена единицы товара} - \text{переменные на единицу товара}} = \\
 &= \frac{268\,746,15}{2713,2 - 2124} = 457 \text{ штук.}
 \end{aligned}$$

Точка безубыточности, руб = $595 \cdot 2713,2 = 1\,239\,932,4$ руб.

6.8 Описание целевых сегментов потребителей

Основными целевыми сегментами рынка являются средний и крупный развивающийся бизнес, а именно:

- Крупные и средние сборочные производства – освещение складов и сборочных цехов ангарного типа с высотой потолков более 5м.
- Логистические компании разрабатывающие и эксплуатирующие складские помещения с высотой потолков более 5м.
- Крупные торговые компании, занимающиеся розничной продажей основных товаров потребления (Лента, GLOBUS, Ашан и др.) – освещение торговых залов.
- Спортивные комплексы крытого типа, предназначенные для проведения межрегиональных игр – освещение игровых площадок, устанавливаемое на специально оборудованных мостиках и на основных несущих конструкциях.

Типичная ситуация осознания потребности:

- Затраты на внутреннее освещение при использовании газоразрядных источников света становятся существенными, а энергоэффективность (лм/Вт) ламп остаётся на прежнем уровне. В продукте видят более надежную, энергоэффективную, постоянно совершенствующуюся систему освещения, основанную на светодиодных источниках света.
- При разработке проекта нового здания или сооружения одной из основных статей затрат становится система искусственного освещения. В результате поиска и сравнения аналогов потенциальный потребитель останавливается на продукте, предлагающем меньшую цену за аналогичные параметры изделия.

Типичная ситуация покупки: отдел финансовых закупок, а также специалист в области освещения (светотехник) внимательно изучают возможности предлагаемого продукта, обсуждают конкретные модификации изделия. В случае установления консенсуса создают документ-решение, на основании которого создается тендер, то есть закупка будет осуществляться на

конкурсной основе. Здесь будет необходимо заверить представителей компании касательно ключевых преимуществ, обрисовать позитивный план на ближайшее будущее. Отдельные функции и запросы могут пересматриваться.

Типичная ситуация потребления: установка предлагаемого оборудования полностью удовлетворяет потребности заказчика в области освещения. Установленная система освещения проходит проверку по нормам освещения контролирующим органом. Продумываются пути оснащения подобной системы освещения в дочерних филиалах и компаниях.

Таблица 24 – Качественные характеристики аудитории B2B. Предприятия среднего и крупного бизнеса

Производственно-экономические критерии	
Отрасль предприятия-потребителя:	- Сборочные производства; - Крупные розничные торговые центры; - Логистические центры; - Спорткомплексы регионального и межрегионального класса.
Размер (весовая категория)	Средний и крупный 100+ человек
Критерии запроса	
Можем ли обеспечить решение специфических проблем заказчика в области закупки	да
Формы взаимоотношений с поставщиком:	Долгосрочное сотрудничество
Мотивация в сфере B2B	
Периодичность покупки	Регулярно, редко
Емкость рынка	Малая группа
Бизнес-мотив:	Экономия денег, времени, нервов, труда

6.9 Бизнес-модель проекта

Для понимания бизнес положения разрабатываемого продукта составим матрицу Остервальдера, отражающую как производственный план, так и план продаж, и саму бизнес модель в целом. (таблица 25).

Таблица 25 – Матрица Остервальдера

<i>Ключевые партнеры</i>	<i>Ключевые виды деятельности</i>	<i>Ценностные предложения</i>	<i>Взаимоотношения с клиентами</i>	<i>Потребительские сегменты</i>
Стратегическое сотрудничество с поставщиками сырья и полуфабрикатов	Сборочное производство. Сборка модульных линейных светильников различных модификаций – готовый продукт	Продукт, который имеет характеристики: 1. Низкая цена 2. Большое количество доступных модификаций светильника 3. Возможность разработки модификации светильника под индивидуальный заказ 4. Эффективная система охлаждения 5. Малый вес одиночного модуля 6. Относительная новизна	1. Постоянная техническая поддержка клиентов 2. Горячая телефонная линия, электронная почта для оформления заказов, помощи при выборе товара	Клиенты – Промышленные и торговые компании, расширяющие производство: сборочные производства в цехах ангарного типа, логистические компании, крупные торговые компании розничной торговли
	<i>Ключевые ресурсы</i> Материальные ресурсы – сырье и полуфабрикаты для изготовления светильника Интеллектуальные ресурсы – патент на полезную модель (промышленный образец)		<i>Канал сбыта</i> 1. Прямые продажи 2. Интернет площадки (Alibaba, Ozon, Aliexpress) 3. Участие в тендерах 4. Выставки в России и странах СНГ	
<i>Структура издержек</i> Фиксированные издержки: – заработная плата работниками в месяц – 202 135,5 руб. – Аренда помещения – 50 000 руб. – Ежемесячный амортизационные отчисления – 5970 руб. Переменные издержки – Материальные расходы – 88 000 руб. – Полуфабрикаты – 4 160 000 руб.		<i>Потоки поступления доходов</i> 1. Регулярный доход от периодических платежей, получаемых от предприятий – 64 595 865,60 руб. Генерирование дополнительных доходов за счет: 1. Продажи лицензии на выпуск продукции (при патентовании) 2. Реклама продукции		

Не менее эффективно и применение матрицы Эшема Маурья под названием Lean Canvas. Данная матрица больше адаптирована под стартапы на ранней стадии (таблица 26).

Таблица 26 – Матрица Lean Canvas

<i>Проблема</i>	<i>Решение</i>	<i>Уникальность</i>	<i>Скрытое преимущество</i>	<i>Сегменты покупателей B2B</i>
<p>Высокие затраты на закупку и обслуживание внутреннего искусственного освещения сборочных цехов, торговых залов, логистических центров.</p> <p>Низкий уровень доверия к производителям светильников сегмента малого бизнеса, вследствие недостатка информации и намеренного завышения технических характеристик предлагаемой продукции</p> <p><i>Существующие аналоги:</i> «LEDEL»: промышленные светильники серии «L-lego II» «Световые технологии»: промышленные светильники серии «HB LED» «DURAY»: промышленные светильники серии «Енисей» «MasterLED»: промышленные светильники серии «ДПП»</p>	<p>Использование предлагаемой разработки светильника, обладающей более низкой ценой, при сохранении надежности в течении всего срока службы.</p> <p><i>Метрики</i> <i>Привлечение</i> – прямые продажи <i>Активация</i> – гарантия срока годности, сервисное обслуживание предлагаемых светильников <i>Удержание</i> – постоянная доработка (обновление) конструкции и расширение типов КСС <i>Распространение</i> – установка аналогичных система освещения по филиалам, партнерам и «дочкам», «сарафанное радио» <i>Оплата</i> – оплата и заключение договора на выпуск светильников после проведения бесплатных светотехнических расчетов.</p>	<p>Продукт, который имеет характеристики:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Низкая цена 2. Большое количество доступных модификаций светильника 3. Возможность разработки модификации светильника под индивидуальный заказ 4. Эффективная система охлаждения 5. Малый вес одиночного модуля 6. Относительная новизна 	<p><i>Каналы</i></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Прямые продажи 2. Интернет площадки (Alibaba, Ozon, Aliexpress) 3. Участие в тендерах 4. Выставки в России и странах СНГ 	<p>Клиенты – Промышленные и торговые компании, расширяющие производство: сборочные производства в цехах ангарного типа, логистические компании, крупные торговые компании розничной торговли</p>
<p><i>Расходы</i></p> <p>Фиксированные издержки: – заработная плата работниками в месяц – 202 135,5 руб. – Аренда помещения – 50 000 руб. – Ежемесячный амортизационные отчисления – 5970 руб. Переменные издержки – Материальные расходы – 88 000 руб. – Полуфабрикаты – 4 160 000 руб.</p>		<p><i>Доходы</i></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Регулярный доход от периодических платежей, получаемых от предприятий – 64 595 865,60 руб. Генерирование дохода за счет: Генерирование дополнительных доходов за счет: 1. Продажи лицензии на выпуск продукции (при патентовании) 2. Реклама продукции 		

6.10 Стратегия продвижения продукта на рынок

Продвижение продукта возможно, если покупатель готов приобрести продукт, который ему действительно нужен.

Основная цель данной стратегии – убедить и доказать покупателю, что качественный продукт не обязательно дорогой продукт, а предлагаемая конструкция светильника является результатом длительного анализа и проведения расчетов тепловых режимов работы.

Выделим следующие способы продвижения продукта:

- Выставки образцов изделий при использовании предлагаемой продукции.
- Участие в специализированных мероприятиях посвященных светотехнической продукции и светотехнике в целом (конференции, выставки, шоу и др.)
- Реклама и рекламные акции в целях побуждения интереса к продукту, распространение пробников.
- Расширение партнерских связей.

Данные меры в той или иной степени в конечном итоге оказывают влияние на объем продаж продукции, что позволит увеличить ее внедрение на рынок.