Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Физики высоких технологий
Направление подготовки: 12.04.02 «Оптотехника»
Кафедра Лазерной и световой техники

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Светодиодный прожектор для локомотивов

УДК 628.9:621.383:629.42

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ВМ5А	Рымхан Ауганбай Муратулы		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор кафедры ЛИСТ	Гриценко Борис Петрович	д.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры менеджмента	Петухов Олег Николаевич	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент кафедры ЭБЖ	Задорожная Татьяна Анатольевна			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

И.О. Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
лазерной и световой техники	Полисадова Елена Федоровна	к.ф.-м.н., доцент		

Томск – 2017 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС-3, критериев и/или заинтересованных сторон
Профессиональные компетенции		
Р1	Способность формулировать цели, задачи и составлять план научного исследования в области светотехники и фотонных технологий и материалов, способность строить физические и математические модели объектов исследования и выбирать алгоритм решения задачи	Требования ФГОС-3 (ОК-1, ОПК- 1, ПК-1, 2, 10) Критерий 5 АИОР (пп. 5.2.1-5.2.3), согласованный с требованиями меж-дународных стандартов EUR-ACE и FEANI. Требования работодателей.
Р2	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	Требования ФГОС-3 (ОПК-2, ПК- 3, 4, 5, 19) Критерий 5 АИОР (пп. 5.2.3, 5.2.6), согласованный с требованиями меж-дународных стандартов EUR-ACE и FEANI Требования работодателей.
Р3	Способность к исследованию и анализу состояния научно-технической проблемы, технического задания, к постановке цели и задач проектирования в области светотехники, оптотехники, 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	Требования ФГОС-3 (ПК- 6, 7, 10) Критерий 5 АИОР (пп. 5.2.5, 5.2.4, 5.2.8), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI Требования работодателей.
Р4	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	Требования ФГОС-3 (ПК- 8, 9, 10, 11) Критерий 5 АИОР (пп. 5.2.5, 5.2.4, 5.2.10), согласованный с требования-ми международных стандартов EUR-ACE и FEANI Требования работодателей.
Р5	Способность к разработке и внедрению	Требования ФГОС-3 (ПК-9, 12,

	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	13, 14,15, 16, 17, ПК-9) Критерий 5 АИОР (пп 5.2.2, 5.2.8), согласованный с требованиями меж-дународных стандартов EUR-ACE и FEANI Требования работодателей.
Р6	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	Требования ФГОС-3 (ОПК-2, ПК- 3, 11, 15, 16, 21) Критерий 5 АИОР (пп 5.2.10, 5.2.16, 5.2.14), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI Требования работодателей.
Р7	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	Требования ФГОС-3 (ОК-1, 2, ОПК-1, 2, ПК-9) Критерий 5 АИОР (п. 5.2.7, 5.2.9), со-гласованный с требованиями между-народных стандартов EUR-ACE и FEANI Требования работодателей.
Р8	Способность к саморазвитию, самореализации, использованию творческого потенциала	Требования ФГОС-3 (ОК-3). Критерий 5 АИОР (п. 5.2.16), согла-сованный с требованиями междуна-родных стандартов EUR-ACE и FEANI Требования работодателей.
Р9	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	Требования ФГОС-3 (ОПК-1, ПК-20, 22, 23), Критерий 5 АИОР (пп. 5.2.12, 5.2.14, 5.2.15), согласованный с тре-бованиями международных стандар-тов EUR-ACE и FEANI Требования работодателей
Р10	Способность 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	Требования ФГОС-3 (ПК- 18, 24), Критерий 5 АИОР (пп 5.2.11, 5.2.15), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI Требования раотодателей.
Р11	Владеть 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	Требования ФГОС-3 (ОПК-3) Критерий 5 АИОР (5.2.13), согласо-ванный с требованиями международ-ных стандартов EUR-ACE и FEANI Требования работодателей.

Министерство образования и науки Российской Федерации

федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт физики высоких технологий
Направление подготовки: 12.04.02 «Оптотехника»
Кафедра лазерной и световой техники

УТВЕРЖДАЮ:
И.О. Зав. кафедрой
_____ _____ Полисадова Е.Ф.

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
4ВМ5А	Рымхан Ауганбай Муратулы

Тема работы:

Светодиодный прожектор для локомотивов	
Утверждена приказом директора	27.12.2016 № 10813/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Требования ГОСТ на лобовые прожектора для локомотивов, существующие конструкции железнодорожных прожекторов, технические документации комплектующих изделий прожектора. Интернет ресурсы и литературы по расчету и конструированию световых приборов.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Аналитический обзор литературы по существующим конструкциям прожекторов и тепловым анализам светодиодных источников света; разработка оптической системы прожектора, моделирование системы теплоотвода прожектора, анализ собственных частот конструкции разрабатываемого прожектора; выводы по разделу; разработка дополнительных разделов: «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение», «Социальная

	ответственность», раздел ВКР на иностранном языке; заключение по работе.
Перечень графического материала	Результаты проведенных расчетов и моделирования (фотографии 3D модели прожектора, распределение теплового поля, КСС, формы колебаний конструкции прожектора, чертежи прожектора)

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Петухов О.Н., доцент каф. менеджмента ИСГТ
Социальная ответственность	Задорожная Т.А., ассистент каф. экологии и безопасности жизнедеятельности ИНК
Разделы, выполненные на иностранном языке	Надеждина Е.Ю., доцент каф. иностранных языков ФТИ

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

Состояние вопроса по разработке светодиодных прожекторов

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор кафедры ЛИСТ	Гриценко Б.П.	д.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ВМ5А	Рымхан А.М.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
4ВМ5А	Рымхан Ауганбай Муратулы

Институт	ИФВТ	**Кафедра**	ЛИСТ
Уровень образования	магистратура	**Направление/специальность**	12.04.02 «Оптотехника»

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	
1. Стоимость ресурсов исследования (НИ): материально-технических; энергетических; финансовых; человеческих; 2. Нормы и нормативы расходования ресурсов; 3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования.	Человеческие ресурсы 2 чел. (проектировщик и инженер – конструктор).
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Планирование и формирование бюджета научных исследований	4.1 Расчет себестоимости проектирования и конструирования прожектора; 4.1.1 Расчет затрат на материалы и комплектующие изделия; 4.1.2 Расчет заработной платы; 4.1.3 Расчет отчисления на социальные нужды; 4.1.4 Расчет накладных расходов; 4.2 Расчет затрат на потребляемую электроэнергию при эксплуатации светового прибора.
Перечень графического материала *(с точным указанием обязательных чертежей):*	
Диаграмма затрат на проектирование и конструирование прожектора	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Петухов Олег Николаевич	к.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ВМ5А	Рымхан Ауганбай Муратулы		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
4ВМ5А	Рымхан Ауганбай Муратулы

Институт	ИФВТ	**Кафедра**	ЛИСТ
Уровень образования	магистратура	**Направление/специальность**	12.04.02 «Оптотехника»

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объектом проектирования является светодиодный прожектор, используемый для освещения пути перед локомотивом в темное время суток. Данный световой прибор устанавливается на передней части локомотива.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Производственная безопасность 1.1. Анализ выявленных вредных факторов при эксплуатации светодиодного прожектора для локомотивов 1.2. Анализ выявленных опасных факторов при эксплуатации светодиодного прожектора для локомотивов	При эксплуатации светодиодного прожектора на машиниста могут воздействовать следующие вредные факторы: 1. Повышенный уровень шума 2. Пульсация освещенности 3. Показатель ослепленности К опасным факторам относится электрический ток.
2. Экологическая безопасность	Источниками света разрабатываемого прожектора служат светодиоды. Светодиодные источники света не содержат токсичных веществ и являются экологически безопасными. Непосредственная утилизация светодиодного прожектора происходит по стандартной схеме утилизации твердых бытовых отходов.
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	Наиболее вероятной ЧС при эксплуатации светодиодного

	прожектора является пожар. Причиной возникновения пожара при работе прожектора может стать короткое замыкание, превышение допустимого напряжения, перегрузка блока питания.
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	Осевой луч прожектора должен быть направлен параллельно горизонтальной плоскости пути по ГОСТ 12.2.056–81. Монтажная поверхность для прожектора должна быть ровной. Монтаж и обслуживание светодиодного прожектора осуществляется при выключенном питании сети. При установке прожектора между корпусом прожектора и окружающими предметами должно остаться необходимое пространство, которое не препятствует естественной конвекции.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент	Задорожная Татьяна Анатольевна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ВМ5А	Рымхан Ауганбай Муратулы		

Реферат

Выпускная квалификационная работа: 114 с., 58 рисунков, 28 таблиц, 64 источника, 2 приложения.

Ключевые слова: лобовой прожектор, светодиоды, локомотив, КСС, сила света, угол рассеяния, отражатель, теплоотвод, радиатор, виброустойчивость, собственная частота, резонанс.

Объектом разработки является лобовой светодиодный прожектор, используемый для освещения пути перед локовотивом в темное время суток.

Целью работы является разработка энергоэффективного и надежного локомотивного прожектора со светодиодными источниками света с улучшенным теплоотводом на основе принудительного охлаждения.

Методология проведения работы. Расчет оптической системы прожектора был проведен в программе LightTools. Для моделирования системы охлаждения прожектора использовался модуль Flow Simulation, интегрируемый в систему SolidWorks. Анализ собственных частот конструкции прожектора проводился с помощью программного комплекса SolidWorks Simulation.

Полученные результаты и их научная новизна – оптическая система из 12 светодиодов XHP-35 с индивидуальными параболоидными отражателями, позволяющая формировать световой пучок с требуемыми светотехническими характеристиками и модернизированная конструкция прожектора с повышенной виброустойчивостью.

Основные характеристики разработанного прожектор: потребляемая мощность 173 – 189 Вт, осевая сила света 839 000 – 950 000 кд (яркий свет), угол рассения светового пучка 3°.

Область применения – железнодорожный транспорт (локомотивы электровоза, тепловоза).

Определения, обозначения, сокращения

В работе использованы следующие обозначения и сокращения:

ТРПК – теплорассеивающие полимерные композиты;

СИД – светоизлучающий диод;

КПД – коэффициент полезного действия;

ПЖ – прожекторная лампа накаливания;

ЛПС – прожектор лобовой светодиодный;

ПП – печатная плата;

LED – light-emitting diode ;

КСС – кривая силы света;

РЖД – Российские железные дороги;

MCPCB – metal core printed circuit board;

ВАХ – вольт-амперная характеристика.

Оглавление

Введение 13
Глава 1. Состояние вопроса по разработке светодиодных прожекторов 16
1.1 Анализ конструкции светодиодных прожекторов 16
1.2 Тепловой анализ светодиодов 25
1.3 Вибростойкость железнодорожного прожектора 39
1.4 Выводы 46
Глава 2. Объект и методы исследования 47
2.1 Объект разработки и требования к лобовым локомотивным прожекторам 47
2.2 Методика исследования и обоснование используемых программных пакетов 48
2.3 Выводы 52
Глава 3. Проектирование светодиодного прожектора для локомотивов 53
3.1 Расчет оптической системы прожектора 53
3.2 Расчет системы охлаждения 61
3.3 Электрическая часть прожектора 76
3.4 Расчет на виброустойчивость железнодорожного прожектора 80
Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение 87
Введение 87
4.1 Первоначальные вложения 87
4.2 Эксплуатационные затраты 92
Глава 5. Социальная ответственность 95
Введение 95
5.1 Производственная безопасность 95
5.2 Экологическая безопасность 100
5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях 101
5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности 103
Заключение 105

Список публикаций 107
Список литературы 108
ПРИЛОЖЕНИЕ А 115
ПРИЛОЖЕНИЕ Б 139

Введение

Актуальность. Существенным фактором в обеспечении безопасности движения поездов в темное время суток является освещение пути лобовым прожектором локомотива. Появление на рынке новых сверхмощных светодиодов сформировало новую тенденцию в разработке и проектировании световых приборов [1]. Использование таких источников значительно влияет на технические, эксплуатационные и экономические характеристики систем освещения. Они находят применение не только в приборах, предназначенных для освещения жилых и производственных помещений, улиц, фасадов и спортивных сооружений, но и в специализированных системах освещения, где их эксплуатационные характеристики, большой срок службы и эффективность имеют крайне важное значение [2]. Примером таких систем могут служить прожектора для железнодорожного подвижного состава. Необходимость модернизации или замены данных систем назревала уже давно. На смену таким системам приходят прожектора, оборудованные светодиодными источника света.

Используемые сегодня прожектора оборудованы малоэффективными источниками света, что приводит к большим энергозатратам, и требуют частого и дорогостоящего технического обслуживания. На отечественных локомотивах применяются встроенные прожекторы со стеклянными параболоидными отражателями диаметром 370 мм и лампами ПЖ 50-500. Стеклянный отражатель и колба лампы накаливания прожектора часто выходят из строя из – за вибрации на железнодорожном транспорте [3]. Поэтому разработка энергоэффективного и надежного локомотивного светодиодного прожектора является актуальным.

Целью работы является разработка энергоэффективного и надежного локомотивного прожектора со светодиодными источниками света с улучшенным теплоотводом на основе принудительного охлаждения. Преимуществом

проектируемого прожектора является энергоэффективность, хороший теплоотвод, устойчивость к вибрациям, характерным для РЖД.

Объектом исследования является лобовой прожектор для локовотивов. Сегодня существует два принципиальных решения светотехнической арматуры для прожекторов на светодиодах. Это отражатели и линзы с эффектом полного внутреннего отражения. В локомотивном прожекторе целесообразно использовать отражатели. Это связанно с тем, что такое решение отличается надёжностью, легкостью обслуживания и дешевизной. А именно эти качества являются наиболее важными для железнодорожных прожекторов.

Постановка задачи:

- Разработать оптимальную оптическую систему прожектора с точки зрения энергоэффективности, соответсвующему требованиям ГОСТ 12.2.056-81 [4].
- Разработать оптимальную систему теплоотвода прожектора на основе принудительного охлаждения.
- Разработать жесткую конструкцию прожектора, обеспечивающую высокую виброустойвость к вибрациям характерным для РЖД.

Научная или практическая новизна работы заключается в разработке оптической системы со светодиодами на основе параболоидных отражаталей, которая позволяет формировать световой пучок с требуемыми светотехническими характеристиками и конструкции прожектора с повышенной устойчивостью к вибрациям, характерным для РЖД.

Практическая значимость результатов ВКР. Разработанный светодиодный прожектор может использоваться для освещения пути перед локомотивом в ночное время суток.

Реализация и апробация работы. Результаты по теме ВКР были представлены на V международной научно – технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Высокие технологии в современной науке и

технике» 5-7 декабря 2016 года. Была опубликована статья по теме ВКР в сборнике XIII Всероссийской научно – технической конференции «Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики» 15-16 марта 2017 года Саранск.

Глава 1. Состояние вопроса по разработке светодиодных прожекторов

1.1 Анализ конструкции светодиодных прожекторов

Известно большое количество прожекторов, которые могут быть использованы на железнодорожном транспорте.

Известен патент [5] на светодиодный световой сигнальный прибор, где светодиоды установлены попарно на плате, а в качестве фокусирующей системы используется оптическая система, содержащая множество оптических элементов. В этом приборе источник света на основе светодиодов адаптируется к старой электрической и оптической конструкции сигнального устройства на основе ламп накаливания. Недостатком такого светосигнального прибора является то, что он не позволяет формировать световые потоки большой интенсивности и узкой направленности.

Более универсальным является световой прибор, предложенный в патенте [6], где в многоцветном комбинированном прожекторе-фаре, содержащем корпус с ребрами охлаждения и прозрачный защитный элемент, средства токопровода с внутренним размещением пластин-держателей с лампами и диодными излучателями в виде ИК-диодов, белых и цветных светодиодов, часть которых помещена в фокусы плоских линз Френеля, изготовленных в шахматном порядке на прозрачной пластмассовой пластине, установленной около выходного отверстия прожектора-фары. На каждом участке прозрачной пластмассовой пластины между четырьмя плоскими линзами Френеля в ее середине и между двумя линзами Френеля на ее краях установлены дополнительные излучатели. Однако и этот световой прибор не позволяет сформировать узконаправленный световой луч высокой интенсивности, поскольку не предназначен для работы с мощными светодиодными системами.

Технические параметры приведенных световых устройств не соответствуют Межгосударственному стандарту ГОСТ 12.2.056-81, где указано, что номинальная осевая сила света лобового локомотивного прожектора должна быть $(6{,}4 \div 9{,}6) \cdot 10^5$ кд (яркий свет) и $(0{,}8 \div 1{,}2) \cdot 10^5$ кд (тусклый свет), а угол рассеяния луча должен составлять около 3°[4].

Полезная модель, приведенная в [7], может использоваться в разных областях, в том числе в качестве прожектора для железнодорожных локомотивов. Техническим результатом изобретения является формирование узкоградусного светового луча с высоким значением осевой силы света.

Для изготовления прожектора с требуемыми световыми характеристиками применяется модульная конструкция. Совокупность определенного количества светодиодных модулей позволяет создать прожектор с требуемой силой света. Рисунок 1.1 демонстрирует принцип формирования мощного источника света на основе модульной светодиодной системы.

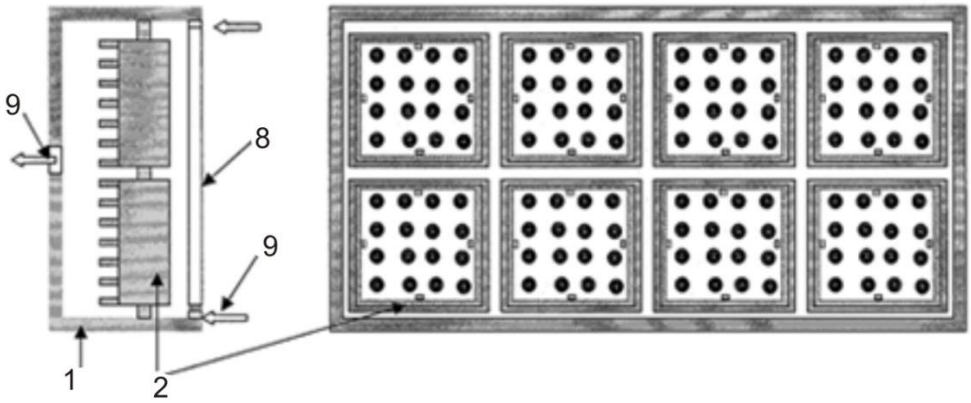


Рисунок 1.1 – Модульный светодиодный прожектор

Отдельные светодиодные модули 2 помещаются в корпус прожектора 1, который изготавливается из металла или композитного материала с высокой теплопроводностью. Корпус прожектора 2 играет роль дополнительного

радиатора, для обеспечения отвода тепла. Каждый модуль имеет прямой тепловой контакт с корпусом прожектора (для простоты на рисунке не показано). Для защиты светодиодных модулей от влияния внешней среды, корпус прожектора закрыт прозрачным защитным колпаком, который изготавливается из стекла или полимерного материала, прозрачного в диапазоне 0,4-1 мкм. Колпак может иметь просветляющее покрытие с внутренней стороны для уменьшения потерь света и/или упрочняющее покрытие с наружной стороны, для уменьшения абразивного воздействия пыли на оптический элемент. В корпусе прожектора 1 имеются отверстия 9 для обеспечения обдува модулей встречным потоком воздуха и обеспечения дополнительного охлаждения.

На рис.1.2 показан отдельный светодиодный модуль, который используется для формирования светодиодного прожектора. Конструкция модуля включает в себя: 1 - корпус модуля, 2 - печатная плата, 3 - светодиоды, 4 - оптический элемент (для ясности рисунка показан только сегмент с линзами Френеля), 5 - управляющие драйверы питания светодиодов.

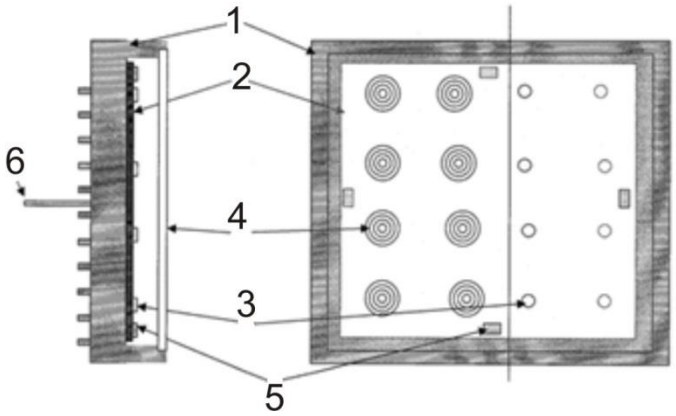


Рисунок 1.2 – Отдельный светодиодный модуль

Корпус 1 светодиодного модуля выполнен из металла или композитного теплопроводящего материала. Оптический элемент 4 крепится к корпусу (1)

посредством полимерных (например, силиконовых) клеев, которые позволяют произвести фиксацию и юстировку оптического элемента для обеспечения совмещения оптических осей линз и светодиодов.

Печатная плата 2 со светодиодами 3 и драйверами питания 5 крепится к теплоотводящему корпусу 1 с использованием теплопроводящей пасты и фиксирующих приспособлений. Питание модуля осуществляется через кабель 6. Печатная плата выполняется из многослойной системы металлизированных слоев и изолирующих слоев (препрег) на металлической (керамической) основе.

Примером исполнения данной полезной модели является прожектор ЛПБ – 01. Внешний вид светодиодного прожектора ЛПБ-01 и локомотива с установленным прожектором (взамен лампы) приведен на рис. 1.3.

Рисунок 1.3 – а) Внешний вид прожектора ЛПБ-01; б) прожектор ЛПБ-01 на электровозе ЭП1М

Лобовой прожектор ЛПБ-01 предназначен для освещения пути перед локомотивом в темное время суток. Источником света служат мощные светодиоды белого цвета свечения со специальной оптической системой, использующей линзы Френеля. Для обеспечения максимального рассеивания и

передачи тепловой энергии светодиоды смонтированы на алюминиевую плату. Корпус прожектора имеет специальную эффективную поверхность для обеспечения теплового режима светодиодов. Прожектор имеет два режима работы [8]. Общие характеристики светодиодного прожектора приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики прожектора ЛПБ-01

Размер, мм	470 x 150 x 380
Вес, кг	18
Потребляемая мощность, Вт	350
Степень защиты от внешних воздействий	IP 63
Климатическое исполнение	УХЛ 1
Устойчивость к внешним механическим воздействиям	М25
Осевая сила света прожектора, кд	режим «ярко» 800000 ± 10% режим «тускло» 100000 ± 20%
Угол рассеивания луча прожектора в горизонтальной и вертикальной плоскостях	2Ѳ/2 = 3°÷ 5° по уровню половинной силы света

К преимуществам данного прожектора можно отнести наличие защитного колпака, имеющего просветляющее покрытие с внутренней стороны, которое позволяет уменьшить потерю света. Недостатком является большая потребляемая мощность.

Лобовой светодиодный прожектор ЛПС–55М предназначен для освещения пути перед локомотивом в ночное время суток и устанавливается на обеих лобовых частях локомотива ТЭМ9 и ТЭМ7А.

Конструктивно прожектор состоит из светооптической системы и специального модуля питания, подключаемого к бортовой сети локомотива. Светооптическая система выполнена в виде единого модуля размещенного в стальном стакане и состоит из светооптического элемента, алюминиевого радиатора с системой принудительного воздушного охлаждения, элементов фиксации и юстировки [9]. Светооптический элемент выполнен на трех алюминиевых платах с закрепленными на них монолитно интегрированными светодиодными излучателями, элементами их защиты, цепями питания и контроля

температуры. Внешний вид прожектора и локомотива с установленным прожектором приведен на рис. 1.4.

Рисунок 1.4 – а) Внешний вид прожектора ЛПС-55М; б) прожектор ЛПС-55М на электровозе ТЭМ9

Общие характеристики светодиодного прожектора приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Технические характеристики прожектора ЛПС-55М

Потребляемая мощность, Вт	200
Рабочая температура, °С	-50...60
Степень защиты от внешних воздействий	Корпус IP20, внешняя сторона IP63
Габаритные размеры, мм	Прожектор 460x233 модуль питания 345x370x57
Масса, кг	34
Сила света по оптической оси не менее, Кд	"ярко": 960000, "тускло": 80000
Устойчивость к внешним механическим воздействиям	ММ1
Цветовая температура излучения, К	4000-4500

Рассматриваемый прожектор обеспечивает необходимую силу света, при этом обладает достаточно небольшой мощностью. Недостатком прожектора является большой вес.

Оптическая система прожектора, предложенной в патенте [10], выполнена в виде плоской матрицы из линз Френеля или асферических линз с параллельными оптическими осями. При этом светодиоды установлены в фокусе линз. Оптическая система прожектора имеет возможность юстирования.

Техническое решение данного изобретения поясняется на рис.1.5, где позициями обозначены: 1 - корпус, 2 - печатная плата, 3 - светодиоды, 4 - оптический элемент (линзы Френеля), 5 - управляющие драйверы питания светодиодов, 6 - интегрированная в корпус теплоотводящая система (радиатор); 7 - крепежно-юстировочная система для оптического элемента 4; 8 - прозрачный колпак; 9 - каналы системы охлаждения посредством внешнего воздушного потока; 10 - система контактов для подвода электропитания, управления яркостью осветительного устройства и включения принудительной системы охлаждения; 11 - система принудительного охлаждения.

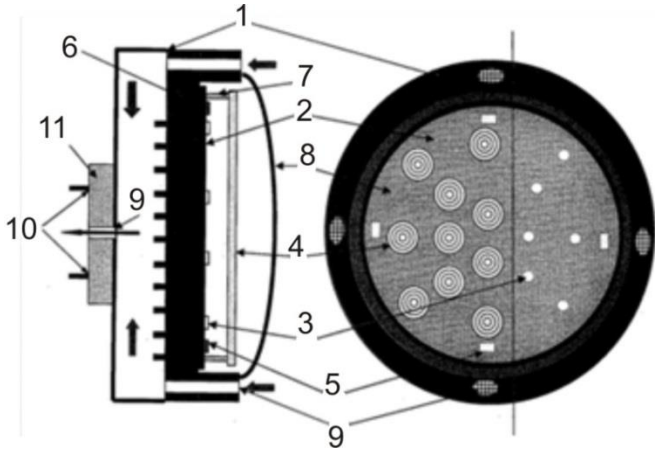


Рисунок 1.5 – Светодиодный прожектор

Корпус 1 осветительного устройства выполнен из металла или композитного материала. Колпак (8) изготавливается из прозрачного полимерного материала или стекла. Возможно нанесение на внутреннюю поверхность колпака

просветляющего покрытия и/или на внешнюю поверхность колпака упрочняющего покрытия.

Оптический элемент (4) крепится к печатной плате (2) посредством фиксирующих устройств (7), выполняющих также функции котировочных элементов, обеспечивающих совмещение оптических осей линз и светодиодов.

Печатная плата (2) со светодиодами (3) и драйверами питания (5) крепится к теплоотводящему элементу (6) с использованием теплопроводящей пасты и винтов. Для обеспечения дополнительного эффективного отвода тепла, служит система воздушных каналов (9), защищенных сеткой (фильтром) для предотвращения попадания посторонних предметов в систему охлаждения и ее загрязнения. При движении транспортного средства, на котором установлено данное осветительное устройство, встречный воздушный поток обеспечит дополнительное охлаждение теплоотводящего элемента (6). При недостаточном охлаждении встречным воздушным потоком, включается (посредством термодатчиков) принудительная система охлаждения (11), которая может быть выполнена на основе различных принципов охлаждения (например, принудительная вентиляция, охлаждение за счет Пельтье элементов и др.). Печатная плата выполняется из многослойного фольгированного стеклотекстолита на металлической (керамической) основе (MCPCB)[10].

Модульная светодиодная конструкция, приведенная в патенте [11], применяется в приборах прожекторного типа, преимущественно, для освещения железнодорожных путей и междупутий.

Модульный светодиодный прожектор содержит защитный корпус, в котором установлены светодиодные модули, блок питания, при этом каждый светодиодный модуль содержит оптическую систему со светодиодными секторами, включающими светодиоды, линзы и теплопроводящие печатные платы на основе алюминия. Светодиоды установлены в фокусе линз. В модульный светодиодный прожектор введены дополнительно светодиодный модуль

холодного резервирования, который обеспечивает возможность независимого отключения и демонтажа одного или нескольких секторов, вышедших из строя, а также вертикальные и горизонтальные регуляторы положения оптической системы. А светодиодные модули размещены на несущем основании, выполненном в виде единой ровной детали или в виде сварной рамы на металлической основе с алюминиевыми теплоотводами, которое позволяет достичь однонаправленности оптических осей. Преобразователь напряжения расположен либо непосредственно в корпусе радиатора модуля, либо в отдельном корпусе. Каждый сектор дополнительно содержит съемные разборные фокусирующие сборки, индивидуальные для каждого светодиода, закрывающие пластины, причем фокусирующие сборки состоят из асферической линзы и держателя на основе из поликарбоната.

Асферические линзы выполнены на основе прозрачного уф-стабилизированного поликарбоната. Преобразователь напряжения выполнен с возможностью ступенчатой регулировки уровня света и содержит гальваническую развязку светодиодов от питающей сети. Закрывающие пластины выполнены на основе полимерного материала или текстолита.

На рисунке 1.6 показан фронтальный вид модульного светодиодного прожектора с основанием в виде единой ровной детали.

1 - светодиоды; 2 - фокусирующие сборки, состоящие из асферической линзы и держателя и представляющие собой оптическую систему прожектора; 3 - асферические линзы; 4 - плата на алюминиевой основе; 5 - конструктив источника питания в отдельном корпусе.

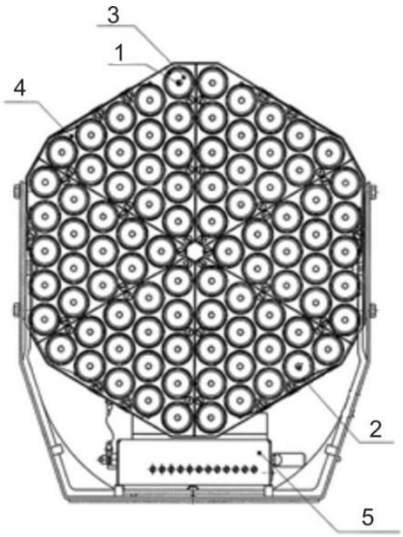


Рисунок 1.6 – Модульный светодиодный прожектор

Уровень светового потока от модульного светодиодного прожектора регулируется дискретно в двух положениях: «ярко» (100%) и «тускло» (10%).

Преимущестом данной конструкций можно назвать наличие дополнительного модуля холодного резервирования, регуляторов положения оптической системы.

1.2 Тепловой анализ светодиодов

Благодаря высокой световой отдаче и длительному сроку жизни (порядка пятьдесят тысяч часов), светодиодные светильники являются очень конкурентоспособным решением. Надежность и выходные характеристики светодиодных источников света сильно зависят от температуры области p-n перехода. Это делает выбор системы теплоотвода или кратко тепловой расчет весьма важным этапом проектирования осветительных систем на основе светодиодов.

У полупроводникового кристалла в отличие от традиционных ламп накаливания основное тепло (>90%) передается за счет механизма теплопроводности непосредственно на металлическую подложку платы светодиода. Лишь очень малая часть тепла уходит в виде теплового (инфракрасного) излучения. Поэтому особенно частой проблемой является проектирование правильного и надежного отвода тепла. Неверно выбранный тепловой режим работы светодиода может привести к нежелательным последствиям. В первую очередь, перегрев может привести к выходу светодиода из строя. У всех светодиодов компании CREE критическая температура перехода – 150°C. Превышение этого порога приведет к выгоранию кристалла светодиода и долгому процессу ремонта [12].

Во-вторых, работа при повышенных температурах значительно уменьшает срок службы светодиодов. Срок службы — функция двух переменных. На рисунке 1.7 приведен график, показывающий срок службы как функцию температуры перехода для различных рабочих токов.

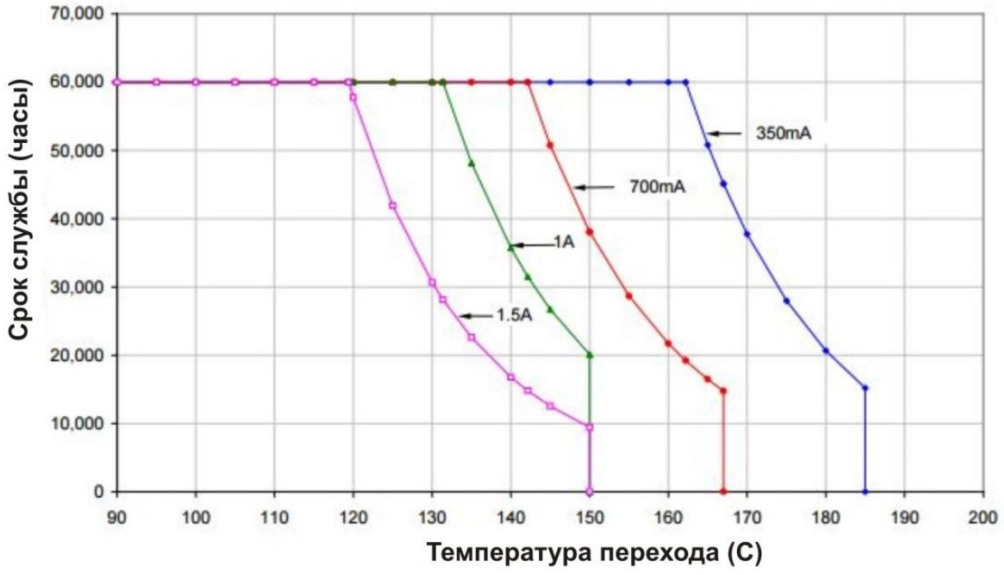


Рисунок 1.7 – Зависимость срока службы от температуры перехода и рабочего тока для светодиода Luxeon K2 [13]

Срок службы определяется как время, за которое световой выход СИД уменьшается до 70% от его первоначального значения. Интересной особенностью этого графика является то, что ниже критичной температуры, в данном случае 120°C, срок службы оказывается постоянным независимо от тока.

Простейший подход для оценки долговечности заключается в том, чтобы рассматривать критичную температуру как верхний предел срока службы для разрабатываемой системы. Выше этой границы может быть использована экспоненциальная зависимость от температуры, т.к. обусловленная температурой надежность имеет распределение Вейбулла [13]. Эта зависимость для срока службы светодиода будет иметь вид:

$$\tau(I_f, T_j) = C_0(I_f)\exp(-mT_j) \quad (1)$$

где $\tau -$ срок службы светодиода;

коэффициент C_0 – функция прямого тока;

$I_f -$ рабочий ток;

m – константа;

$T_j -$температура перехода.

Световой поток светодиода изменяется при изменении температуры перехода. На рисунке 1.8 изображена зависимость величины относительного светового потока от температуры для светодиодов серии MKR компании CREE [14]. Как видно из графика, с увеличением температуры перехода светодиода величина светового потока уменьшается, и наоборот – при хорошем охлаждении поток возрастает.

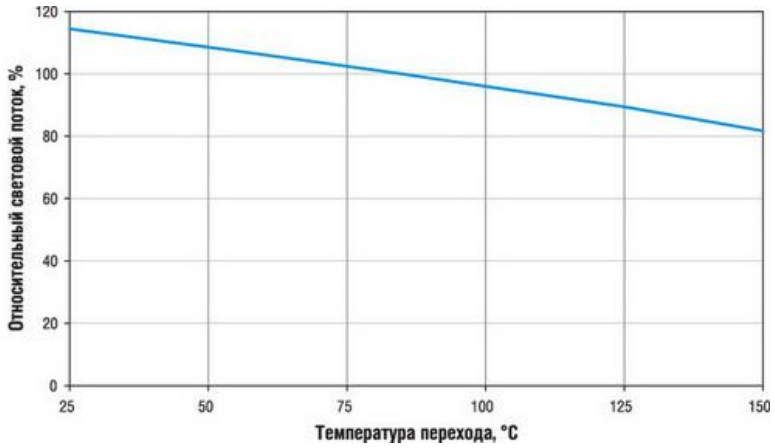


Рисунок 1.8 – Зависимость светового потока от температуры перехода на примере светодиода серии MKR

С изменением температуры меняется и величина прямого падения напряжения на светодиоде (V_f). С увеличением температуры напряжение уменьшается. Часто эта зависимость является линейной с коэффициентом, указанным в технической документации. Например, этот коэффициент может быть равным b_1 = –4,5 мВ/К в диапазоне –10…100°С при начальной температуре платы $T_{b,ref}$ = 25°С для светодиода LEW E3A компании OSRAM [15]. Зависимость напряжения от температуры определится следующим образом:

$$V_f(T) = V_f(I_f) + b_1(T_b - T_{b,ref}) \quad (2)$$

Заметим, что не все вендоры используют температуру платы T_b как контрольную в данном соотношении, некоторые из них используют температуру перехода T_j.

Предполагается, что световая мощность, содержащаяся в световом пучке, незначительна. Как было сказано, для более точного расчета тепловых условий в системе производителям СИД следует предоставлять информацию о реальной мощности, рассеиваемой на радиаторе. Компания Mentor Graphics предлагает оборудование для точного определения световой мощности СИД TeraLED. В

отсутствие таких данных для расчета можно использовать коэффициент преобразования энергии η. Заметим, что этот коэффициент может также зависеть от контрольной температуры.

Синие светодиоды компании Cree обладают КПД более 50%, а эффективность белых светодиодов данной компании составляет выше 40%. Тогда при нормальных условиях эксплуатации в среднем 50 – 60% потребляемой мощности преобразуется в тепло. Компания CREE в документе «Thermal Management of Cree XLamp LEDs» рекомендует пользоваться допущением, что в тепло преобразуется 75% потребляемой мощности, данное предположение позволяет перестраховаться при разработке теплоотвода [16]. Мощность, которую требуется рассеивать, можно рассчитать по формуле:

$$P_t = 0{,}75 \cdot V_f \cdot I_f \tag{3}$$

где P_t – тепловая мощность (Вт);

V_f – прямое падение напряжения на светодиоде (В);

I_f – ток через светодиод (А).

Механизм отвода тепла в атмосферу у светодиодов более сложен. Систему охлаждения светодиодов можно представить в виде эквивалентной схемы последовательно и параллельно подключенных тепловых сопротивлений. В качестве примера для составления эквивалентной цепи возьмем один светодиод, установленного на печатной плате, прикрепленной к радиатору (рисунок 1.9).

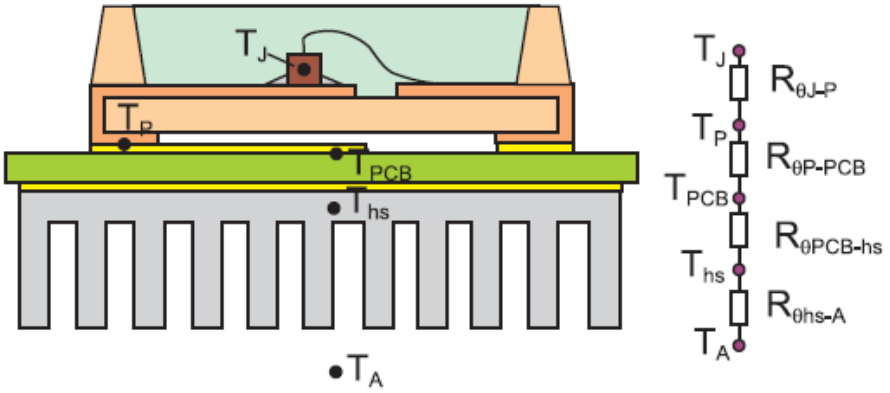


Рисунок 1.9 – Модель теплового сопротивления для одиночного светодиода

Путь отвода тепла образуется множеством тепловых сопротивлений: «p-n переход – теплоотвод корпуса», «теплоотвод корпуса – печатная плата», «печатная плата – радиатор», «радиатор – окружающая среда». Тогда тепловое сопротивление всей системы охлаждения высчитывается по следующей формуле [17]:

$$R_{\theta J-A} = R_{\theta J-P} + R_{\theta P-PCB} + R_{\theta PCB-HS} + R_{\theta HS-A} \quad (4)$$

Чем меньше значение полного теплового сопротивления, тем лучше тепло отводится от светодиода. Тепловое сопротивление – это способность тела (поверхности, слоя или его части) препятствовать прохождению теплового потока. Тепловое сопротивление между элементами a и b рассчитывается по формуле:

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

где $R_{\theta a-b}$– тепловое сопротивление между элементами a и b (°C/Вт);

T_a – температура элемента a (°C);

T_b – температура элемента b (°C);

P_t– рассеиваемая мощность, рассчитываемая по формуле 3.

Для расчета температуры перехода T_j наиболее часто используется следующее уравнение:

$$T_j = R_{\theta J-P} \cdot P + T_P \quad (6)$$

где $R_{\theta J-P}$ – тепловое сопротивление переход – контрольная точка на корпусе светодиода;

P – мощность, рассеиваемая светодиодом;

T_P – температура на контрольной точке корпуса светодиода.

Тепловое сопротивление между p-n переходом и теплоотводом корпуса указывается производителем в технической документации светодиода.

В работе [18] предлагается для определения температуры перехода вместо разности температур в двух различных точках «переход – теплоотвод» использовать временное различие в температуре перехода. Такой подход отличается высокой точностью при измерении температуры перехода. Основное уравнение разностного метода можно выводить следующим образом.

Предположим, в начальном состоянии к прибору прикладывается известная тепловая мощность P_{H1}, а в конечном состоянии – P_{H2}. В этом случае температура перехода для каждого из этих двух состояний будет равна:

$$T_{j1} = R_{\theta J-P} \cdot P_{H1} + T_P, \quad (7)$$

$$T_{j2} = R_{\theta J-P} \cdot P_{H2} + T_P \quad (8)$$

Вычитая (7) из (8) получим:

$$T_{j2} - T_{j1} = R_{\theta J-P} \cdot (P_{H2} - P_{H1}) \quad (9)$$

После преобразования получим:

$$R_{\theta J-P} = \frac{\Delta T_j(t)}{\Delta P_H} \quad (10)$$

где $\Delta T_j(t) = T_j(t_2) - T_j(t_1) = T_{j2} - T_{j1}$;

$\Delta P_H = P_{H2} - P_{H1}$.

Уравнение (10) показывает, что тепловое сопротивление можно рассчитать из разности между начальным и конечным стационарным значением температуры

перехода и соответствующим изменением тепловой мощности на переходе (рис. 1.10).

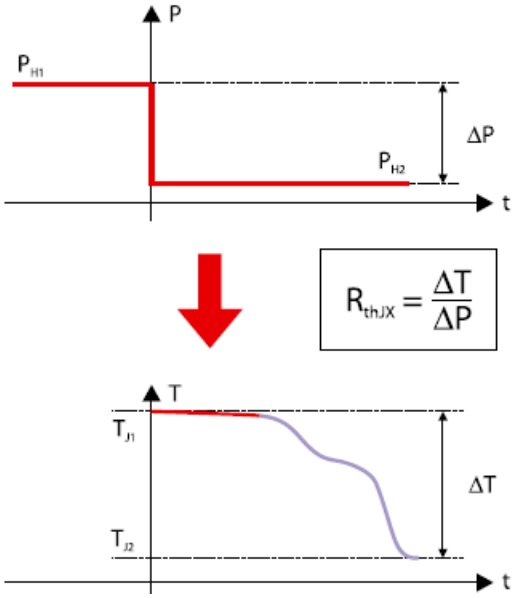


Рисунок 1.10 – Тепловое сопротивление переход – точка X, рассчитанное из временной разности температуры перехода и мощности, рассеиваемой на приборе

Рассмотрим более подробно, какой вклад вносят в общее тепловое сопротивление такие элементы как печатная плата, теплопроводящие материалы и радиатор.

Печатная плата. Большинство светодиодов компании CREE необходимо устанавливать на плату (для подвода цепей питания светодиода и механического монтажа). От выбора материала печатной платы и топологии в значительной степени зависит тепловое сопротивление. Стеклотекстолит типа FR-4 является одним из наиболее часто используемых материалов при изготовлении печатных плат, однако обладает очень низкой теплопроводностью. На рисунке 1.11 приведена структура ПП из FR-4.

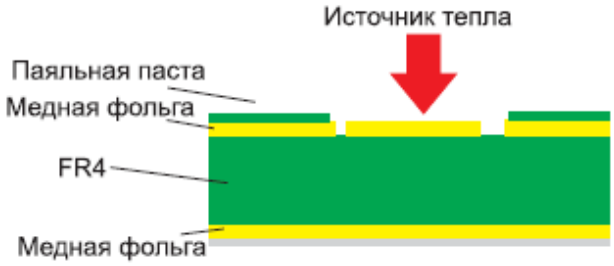


Рисунок 1.11 – Структура печатной платы из стеклотекстолита FR-4

Используя значения теплопроводности и толщины слоев из таблицы 3 общее тепловое сопротивление для ПП из FR-4 можно вычислить по формуле:

$$\theta_{PCB} = \theta_{layer1} + \theta_{layer2} + \theta_{layer3} + \ldots + \theta_{layerN} \quad (11)$$

Таблица 3 – Значения для печатной платы из стеклотекстолита FR-4

Материал слоев	Толщина, мкм	Теплопроводность, Вт/м*К
Паяльная паста SnAgCu	75	58
Верхняя фольга Cu	70	398
Стеклотекстолит FR-4	1588	0,2
Нижняя фольга Cu	70	398

Тепловое сопротивление отдельного слоя определяется выражением:

$$\theta_{layer} = l/(k \times A) \quad (12)$$

где l – толщина слоя;

k – коэффициент теплопроводности;

A – площадь контактной площадки, отводящей тепло.

Для платы из стеклотекстолита толщиной 1,6 мм и имеющей форму «звезды» с площадью поверхности 270 мм^2 тепловое сопротивление составит примерно 30 °C/Вт [19].

Печатная плата из фольгированного алюминия (MCPCB) состоит из четырех слоев: паяльная маска, слой медной фольги, теплопроводящий

диэлектрический слой и металлическая основа (рис.1.12а). Тепловое сопротивление таких печатных плат формы «звезда» составляет 0,2 °C/Вт.

Рисунок 1.12 – а) Структура печатной платы из фольгированного алюминия (MCPCB); б) Тепловые отверстия в печатной плате из стеклотекстолита FR-4

В [20] изложены рекомендации для улучшения теплопроводности платы из стеклотекстолита типа FR- 4. Одной из них является просверливание отверстий и последующее их омеднение (рис.1.12б).

Для платы размером 270 мм^2 с пятью отверстиями Ø0,6 мм общее тепловое сопротивление приблизительно составит 12 °C/Вт**,** что значительно лучше, чем первоначальное значение сопротивления той же платы без отверстий – 30 °C/Вт.

Диаграмма на рис.1.13 иллюстрирует зависимость теплопроводности от изменения диаметра и количества отверстий. В этом эксперименте все отверстия были заполнены припоем SnAgCu. Как и ожидалось, чем больше диаметр, тем меньше тепловое сопротивление [20].

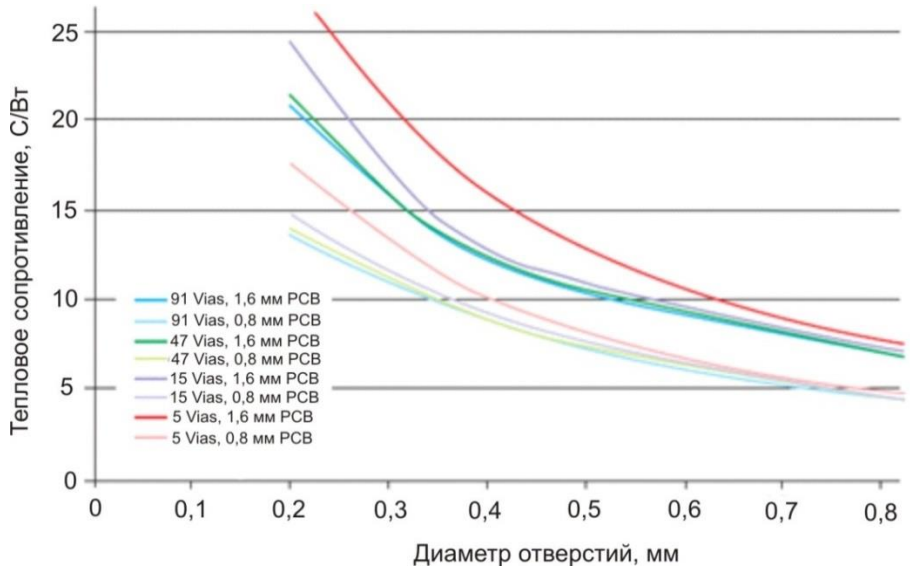


Рисунок 1.13 – Диаграмма для FR-4 печатной платы с различной конфигурацией диаметров и отверстий

Теплопроводящие материалы необходимы для создания хорошего теплового контакта между печатной платой и радиатором или между светодиодом и радиатором. Помимо создания надежного теплового контакта, некоторые теплопроводящие материалы, в зависимости от дизайна охлаждающей системы, могут выполнять и другие функции, такие как изоляция электрических узлов схемы или создание механического крепления. К основным теплопроводящим материалам относятся термопасты, материалы с изменением фазы, гели, термоклей.

При выборе теплопроводящего материала необходимо учесть многие параметры, не только величину теплопроводности. Часто упускают из виду толщину клеевого слоя материала, а как следует из формулы (12), приведенной выше, тепловое сопротивление напрямую зависит от этого параметра. Иногда более тонкий клеевой слой с плохим значением теплопроводности имеет более низкое тепловое сопротивление по сравнению с более толстым слоем, но с

лучшим значением теплопроводности. Оба этих условия необходимо учитывать при выборе материалов.

Радиатор – это, пожалуй, самый важный элемент в системе охлаждения светодиода; он отводит тепло от печатной платы или напрямую от светодиода, и рассеивает тепло в воздухе. К радиатору предъявляются следующие требования: материал радиатора должен быть с высоким значением теплопроводности, площадь поверхности радиатора должна быть максимальной, а также радиатор обладал высоким коэффициентом излучения, чтобы рассеять тепло в виде теплового излучения. Анодированный алюминиевый радиатор обладает большим коэффициентом излучения. Помимо охлаждения, радиатор может выполнять и другие функции, наиболее часто он может выступать в роли корпуса либо держателя.

Из отечественных производителей алюминиевых радиаторов можно выделить петербургскую фирму ЛИГРА, которая выпускает широкий ассортимент игольчатых и ребристых радиаторов.

Основным недостаткам системы охлаждения на основе алюминиевого радиатора относится многослойность конструкции. Многослойной конструкции свойственны сопутствующие переходные тепловые сопротивления, которые хоть и можно минимизировать применением специальных теплопроводящих материалов (изолирующие пластины, пасты, клейкие вещества, материалы для заполнения воздушных промежутков и др.), тем не менее, приводят к увеличению температуры перехода [21].

Традиционно для охлаждения используются радиаторы, выполненные из металла с высокой теплопроводностью и их сплавов. По последним результатам, полученным в сфере полимерного компаундирования, можно утверждать, что в скором будущем будут широко использоваться теплорассеивающие полимерные композиты (ТРПК) с теплопроводностью многократно, в десятки и сотни раз превосходящих теплопроводность обычных пластмасс. Такое резкое повышение

теплопроводности ТРПК достигается за счет применения наполнителей с высокой теплопроводностью (до 250 Вт/мК), специального оборудования для их наполнения и подбора специальных технологических добавок [22].

Как показывает мировой опыт, применение теплорассеивающих полимерных композитов для решения проблемы тепловой стабильности дает возможность повысить надежность работы LED-светильников, снизить себестоимость их изготовления. При этом использование ТРПК целесообразно как в конструкции самих светодиодов, так и в их «обрамлении» — термоинтерфейсах, собственно самих светильниках, фонарях.

Американская фирма Lynk Labs запатентовала технологию ThermaLynk, использующую ТРПК как конструкционную основу LED Chip (рис.1.14а). При этом кристалл размещается непосредственно в монолитном модуле (подложка-радиатор), отлитом из ТРПК. Такое решение резко упрощает традиционную конструкцию светодиода, сокращает количество его комплектующих. В этой конструкции тепло от кристалла напрямую без всяких промежуточных элементов передается и рассеивается лишь одним элементом, изготовленным из ТРПК. Конкретная форма, размеры теплопередающих ребер могут легко варьироваться и быть «заточены» под конкретное применение. Вполне понятно, что такой подход снижает себестоимость светодиода, позволяет повысить мощность излучения света [22].

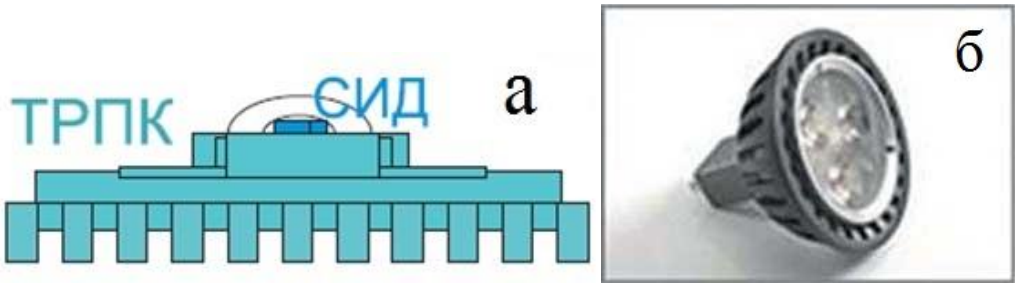


Рисунок 1.14 – а) Перспективная (малокомпонентная) конструкция светодиода на базе ТРПК; б) Светильник MR16 с корпусом из ТРПК

Применение теплорассеивающих полимерных композитов для охлаждения может существенно уменьшить вес светодиодных изделий. Например, компания Philips разработала серию инновационных светильников MR16, практически весь выполненных из теплорассеивающей пластмассы фирмы DSM (США) (рис. 1.14б).

Если естественного охлаждения недостаточно для отвода тепла, то требуется использовать принудительное охлаждение. Существует множество вариантов активного охлаждения – от кулеров до водяного охлаждения. Если применение активного охлаждения неизбежно, следует учесть то, что светодиоды могут работать в течение десятков…сотен тысяч часов, поэтому следует предусмотреть наличие системы защиты светодиодов от перегрева при выходе из строя устройств активного охлаждения, иначе выход из строя устройств принудительного охлаждения практически сразу же повлечет за собой выход из строя светодиода из-за перегрева. Помимо срока службы, важными параметрами являются эффективность, надежность, низкий уровень шума, цена, удобство при обслуживании, потребляемая мощность. Зачастую устройства принудительного охлаждения требуют дополнительного питания, это приводит к снижению КПД системы в целом.

Для эффективного охлаждения часто радиатор дополняют вентилятором. Такой вид воздушного охлаждения сравнительно недорогой, но из-за генерации звукового шума используется ограниченно. Для преодоления указанного минуса и снижения размеров систем охлаждения была разработана струйная система обдува радиатора [23]. Например, разработанная компанией Nuventix струйная система охлаждения светодиодов SynJet обеспечивает тепловое сопротивление 0,75…2,65 К/Вт. При этом обладает низким уровнем генерируемого звукового шума и малым размером. Принцип работы этих систем основан на периодической обдуве ребер радиатора импульсными турбулентными потоками воздуха. Такой способ отвода тепла является более эффективным, чем при обдуве равномерным воздушным потоком обычного вентилятора.

В мощных светодиодных прожекторах, видеопроекторах, а также специальных светосигнальных устройствах рассеиваемая мощность может составлять сотни ватт. В таких случаях выходом из положения служит применение жидкостных охладителей, которые позволяют уменьшить тепловое сопротивление охладителя до требуемых десятых-сотых долей К/Вт [24]. Была разработана специальная конструкция светодиода, обеспечивающая прямое жидкостное охлаждение светодиодного чипа на основе стандартного светодиодного корпуса [25]. Теплоотвод в таком случае осуществляется двумя путями: первый – через корпус светодиода (традиционный способ), второй – через верхнюю поверхность светодиодного чипа за счет потока жидкости в камере между поверхностью чипа и куполообразной линзой.

Следует подчеркнуть, что система охлаждения светодиода иногда дополняется элементом Пельтье, который устанавливается между курпусом светодиода и теплоотводом. Однако элемент Пельтье не применяется в системах теплоотвода мощных светодиодов, так как обладает низким КПД [26].

1.3 Вибростойкость железнодорожного прожектора

Для многих отраслей экономики одной из важных задач является повышение срока службы осветительных приборов, работающих в экстремальных условиях. Осветительные приборы, работающие на предприятии тяжелой промышленности, портов, горных разработок, мостов, улиц с активным движением, железных дорог, строи площадок, сельскохозяйственных объектов, спортивных комплексов и иных сооружений, подвергаются воздействию вибрационных и ударных нагрузок.

Объектам с чрезвычайными параметрами вибрационного состояния относятся производственная, строительная и портовая подъёмная техника, железнодорожные средства передвижения, а также объекты железнодорожной

инфраструктуры [27-29]. В таких условиях надёжность осветительного прибора, установленного на такой технике, зависит от способности конструкции осветительного прибора противостоять воздействию различных вибраций.

Безаварийный срок эксплуатации ламп накаливания, применяемых в судовых навигационных огнях и осветительных прожекторах строительных кранов, в первом случае в среднем составляет –1500 часов, а во втором – сутки.

На основе анализа путей увеличения безаварийного срока службы осветительных устройств можно выделить два направления повышения надежности эксплуатации осветительных устройств: первое – разработка и использование более надежных источников света, второе – применение в конструкции осветительного устройства сплавов с демпфирующими свойствами и пластических масс [30].

Для оценки виброустойчивости конструкций различных устройств, а также виброустойчивости осветительных приборов, в Российской Федерации существуют различные физические методы испытаний, приведенные в ГОСТ Р МЭК 60598-1-2011 [31]. При испытаниях на виброустойчивость по отечественным и европейским стандартам исследуемая конструкция подвергается воздействию гармонических и случайных вибраций с различными спектрами частот и с различными амплитудами. Процесс проведения таких испытаний занимает много времени и стоит дорого.

В работе [32] рассматривается конструкция светодиодного прожектора для железнодорожного транспортного средства, позволяющая регулировать световую отдачу. Конструкция данного прожектора имеет возможность заменить и настроить светодиодов во время эксплуатации железнодорожного транспорта. Центральная линза и вторичная оптика, устанавливаемая над каждым светодиодом, обеспечивают требуемые светотехнические характеристики прожектора.

Прожектор, предложенный в работе [32], вначале проектировался для применения лампы накаливания. При замене ламп накаливания в серийном локомотивном прожекторе на светодиодные источники света возникают определенные трудности. Эти трудности связаны с увеличением веса всей конструкции модернизированного прожектора за счёт элементов крепления и регулировки установки светодиодов, а также элементов систем охлаждения. В свою очередь, это приводит к изменению пространственных координат центра масс конструкции, в итоге меняется спектр частот собственных колебаний модернизированной конструкций.

Требования безопасности РЖД, предъявляемые к осветительным железнодорожным устройствам, усложняют задачу снабжения серийных локомотивных прожекторов светодиодными источниками света (ГОСТ 12.2.056-81 [4]). Светотехнические характеристики модернизированного прожектора могут не соответствовать с указанными требованиями в результате резонансов конструкции.

В работе [32] не проведен анализ собственных частот предлагаемой конструкции.

Ряд рассмотренных причин приведет к необходимости оптимизации конструкторских решений модернизированного прожектора на основе анализа частот собственных колебаний его конструкции. Такой анализ позволяет указать направления и средства увеличения виброустойчивости конструкции локомотивного прожектора.

В работе [33] представлена конструкция светодиодного прожектора, в котором светодиодные источники света установлены в фокусе параболического отражателя. Общий внешний отражатель преобразует световой поток, формируемый отражателем каждого светодиода источника света в световой поток с пиковым распределением силы света. Данную конструкцию осветительного прибора можно использовать для освещения шасси летательных аппаратов.

Обычно такая конструкция состоит из большого количества составляющих ее элементов. Это может привести к появлению различного типа резонанса конструкции при ее эксплуатации. Определение резонансных частот конструкции модернизированного прожектора дает возможность увеличить безаварийный срок эксплуатации такого осветительного прибора. Анализ собственных частот конструкции может предсказать конструкторские решения, повышающие жесткость конструкции прибора и позволяющие вывести часть частот собственных колебаний за границы диапазона вибраций прожектора при эксплуатации.

Опыт эксплуатации осветительных приборов при различных внешних условиях указывает, что на характер резонанса конструкции влияют не только элементы конструкции, но и внешние воздействия (температура, давление, сила инерции, влажность и т. д.). Сохранение стабильных геометрических размеров конструкции светового прибора во многих случаях определяет безаварийный срок службы светового прибора и его эксплуатационные характеристики.

Спектр частот вибраций железнодорожного транспорта определяют вибрации всего железнодорожного состава, обусловленные расстояниями между опорными элементами дороги, соседними тележками смежных вагонов, тележками одного вагона, колёсными парами тележки, расстоянием между вагонами, а также скоростным режимом, протяженностью рельсов, качеством насыпи и т.д.

Основным источникам вибраций при движении железнодорожного транспортного средства относятся непосредственно транспортное средство, рельсы, колеса и рельсовый путь (согласно данным Решения Комиссии Таможенного союза от 15.07.2011 г. N 710 «О принятии технических регламентов таможенного союза» «О безопасности железнодорожного подвижного состава», «О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта» и «О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта» [34]).

В работе [35] указывается, что диапазон частот вибраций, характерные для РЖД, составляет от 0,001 до 150 Гц. Повышения безаварийного периода службы локомотивного прожектора со светодиодными источниками света можно добиться путем увеличения жесткости его конструкции [36].

В работе [3] проведен анализ частот собственных колебаний конструкции лобового фонаря электровоза серии ВЛ. Источником света фонаря служит лампа накаливания ПЖ на 500 Вт и 50 В. Опыт эксплуатации данного светового прибора показывает, что очень часто выходит из строя лампа ПЖ, а также лопается стеклянный параболоидный отражатель диаметром 370 мм, размещенный за лампой. Указанные неисправности могут возникать в результате воздействия вибрации.

Для определения резонансных частот конструкции фонаря использовалась программная среда ANSYS. Упрощенная 3D модель лобового прожектора показана на рисунке 1.15б.

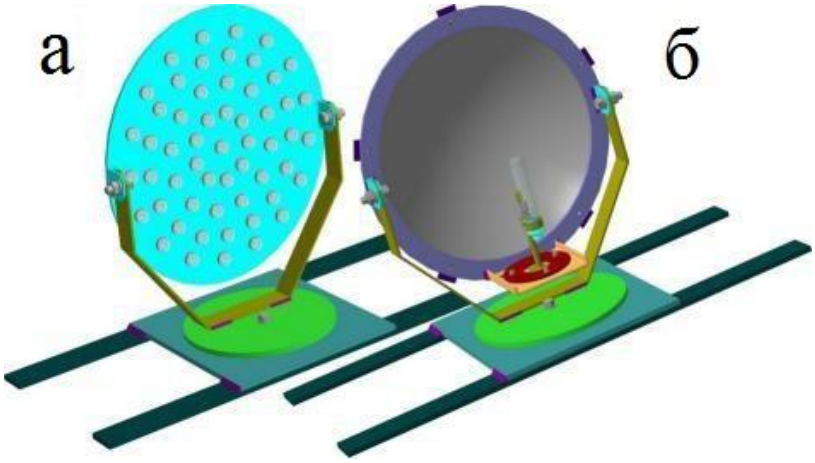


Рисунок 1.15 – Твердотельная модель лобового локомотивного прожектора с источниками света: а) светодиоды; б) лампа накаливания ПЖ 500 –50

В результате моделирования были определены частоты собственных колебаний и соответствующие им различные колебательные моды конструкции.

В таблице 4 представлены собственные частоты прожектора с лампой накаливания.

Таблица 4 – Собственные частоты прожектора с лампой накаливания

№	1	2	3	4	5	6
Частота, Гц	22,368	46,49	62,595	95,99	154,29	206,26

На рисунке 1.16 приведены формы колебаний конструкций прожектора с лампой накаливания на двух собственных частотах: 22,368; 95,99 Гц.

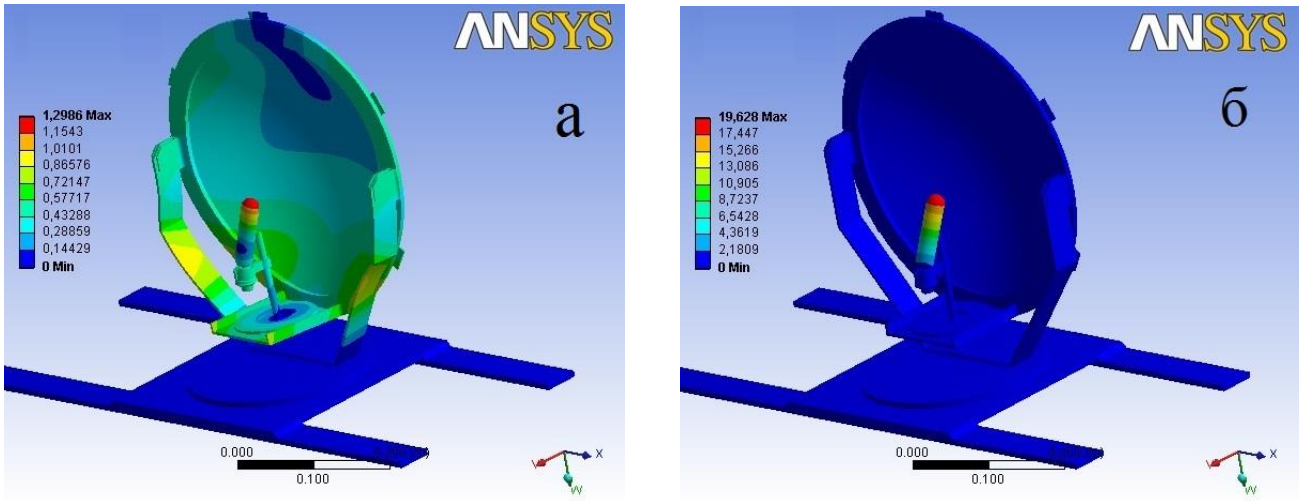


Рисунок 1.16 – Характер колебаний конструкций лобового фонаря с лампой накаливания на собственных частотах*:* а) *f* =22,368 Гц; б) *f* = 95,99 Гц

Результаты, полученные в работе [3], показали, что стеклянный отражатель фонаря испытывает наибольшую деформацию на собственных частотах 22,368 Гц, 46,49 Гц и 62,595 Гц. Колебания в указанном диапазоне могут быть вызваны вибрациями, обусловленными расстоянием между колёсными парами тележки, общей протяженностью рельсов, а также расстоянием между опорными элементами пути. На частотах $f \geq$ 95,99 Гц наибольшим деформациям подвержена стеклянная колба лампы ПЖ, при этом деформация параболоидного

отражателя прожектора незначительна. Поскольку опыт эксплуатации подтверждает, что колба лампы лопается достаточно часто, то можно сделать вывод о том, что вибрации на частотах $f \geq 95{,}99$ Гц имеют место на реальной конструкции прожектора.

А также проведен анализ собственных частот модернизированного прожектора со светодиодными источниками света (рис.1.15а). Следует подчеркнуть, что вес модернизированного прожектора увеличился примерно на 900 г. Результаты моделирования показали, что наибольшим деформациям подвергаются подложка, несущая светодиодные источники света, и ее кронштейн. Характер колебания модернизированного прожектора на двух резонансных частотах представлен на рис.1.17.

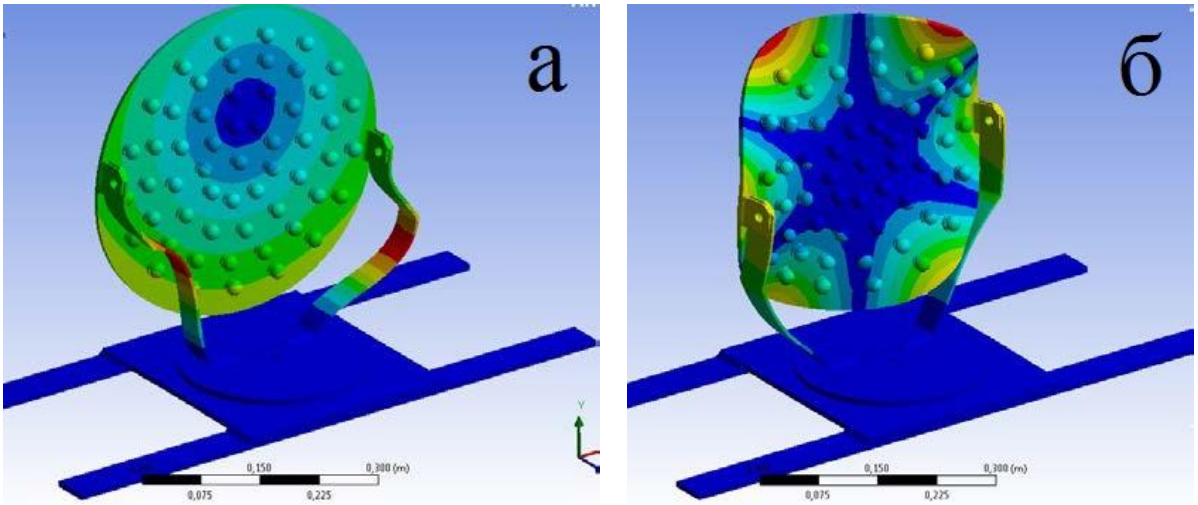


Рисунок 1.17 – Характер деформации модернизированного прожектора со светодиодными источниками света на собственных частотах:
а) f =146 Гц; б) f = 393 Гц

В работе указаны направления и средства увеличения виброустойчивости конструкции прожектора. Предлагается для увеличения жесткости несущего кронштейна, а также радиальную и окружную жесткость подложки применять в

конструкции косынки, обечайки и откосы. Следует отметить, что минимизация веса всей конструкции может стать резервом повышения вибростойкости прожектора.

1.4 Выводы

1. Основное количество, используемых сегодня, локомотивных прожекторов оборудовано малоэффективными источниками света, что приводит к большим энергозатратам.

2. Надежность и выходные характеристики светодиодных источников света сильно зависят от температуры области p – n перехода. Поэтому правильный выбор теплового режима светодиодов является весьма важным этапом проектирования осветительных систем на основе светодиодов.

3. Повышенный уровень вибраций на железнодорожном транспорте приведет к необходимости оптимизации конструкций локомотивного прожектора на основе анализа собственных частот его конструкции. Надёжность таких осветительных приборов зависит от способности конструкции противостоять воздействию различных вибраций.

Глава 2. Объект и методы исследования

2.1 Объект разработки и требования к лобовым локомотивным прожекторам

Объектом разработки является лобовой прожектор со светодиодными источниками света для локомотивов, использующий параболоидные отражатели для формирования требуемых светотехнических характеристик.

Для железнодорожного прожектора, используемого в качестве головного, нормируемыми светотехническими характеристиками являются сила света и угол расходимости на уровне половины силы света.

В соответствии с Решениями Комиссии Таможенного союза от 15.07.2011 г. N 710 О принятии технических регламентов таможенного союза «О безопасности железнодорожного подвижного состава» лобовой прожектор должен удовлетворять ряду требований: прожектор должен быть установлен по продольной оси симметрии локомотива; осевой луч фонаря должен быть направлен параллельно горизонтальной плоскости пути; номинальная осевая сила света фонаря должна быть $(6{,}4–9{,}6)\cdot 10^5$ кд; схема включения фонаря должна предусматривать возможность включения яркого света, обеспечивающего номинальную осевую силу света, и тусклого света, обеспечивающего силу света в пределах $(0{,}7–1{,}2)\cdot 10^5$ кд в соответствии с ГОСТ 12.2.056–81 (Система стандартов безопасности труда. Электровозы и тепловозы колеи 1520 мм. Требования безопасности). Угол рассеяния луча в вертикальной и горизонтальной плоскостях около 3^0 [4].

Сегодня существует два принципиальных решения светотехнической арматуры для прожекторов на светодиодах. Это отражатели и линзы с эффектом полного внутреннего отражения. В локомотивном прожекторе целесообразно использовать отражатели. Это связанно с тем, что такое решение отличается

надёжностью, легкостью обслуживания и дешевизной. А именно эти качества являются наиболее важными для железнодорожных прожекторов.

2.2 Методика исследования и обоснование используемых программных пакетов

Для расчета формы отражателя и определения его оптимальных параметров был использован программный пакет LightTools, предназначенный для автоматизированного расчета оптических систем.

Программный пакет LightTools предназначен для трехмерного моделирования оптических и световых приборов. Программа LightTools предоставляет возможность построить модель осветительного устройства с различными источниками света и составляющими его механическими и оптическими элементами. При расчете оптической системы учитываются все возможные преобразования света, такие как отражение, преломление, рассеяние, дисперсия, дифракция, полное внутренне отражение и другие [37].

LightTools обладает мощными инструментами проектирования, которые позволяют быстро и эффективно создавать и модифицировать имеющиеся конструкции систем освещения - от начальной концепции до последующих инженерных итераций и уточнений. LightTools имеет несколько модулей, которые могут быть лицензированы в различных конфигурациях в соответствии с требованиями заказчика. Система содержит основной модуль, модули освещения, оптимизации, конвертор файлов в/из стандартных CAD-форматов: STEP, IGES и SAT, модуль прямого обмена данными с CATIA, Advanced Physics, SolidWorks. Так же при помощи LightTools можно создать ies-файл, который в дальнейшем можно использовать в таких программах, как Dialux, Lightscape и т.д.

При создании новой конструкции, модернизации существующих образцов техники проводят целый ряд расчетов. Однако теоретические расчеты не всегда

применимы к реальным конструкциям. Тогда для реализации постановленной задачи необходимы численные методы. Программный комплекс SolidWorks широко применяется для проектирования новых образцов техники в современной инженерной практике. Это объясняется функциональными возможностями 3D моделирования и наличием полного набора средств инженерного анализа, ориентированных как на рядовых инженеров – проектировщиков, так и на профессиональных расчетчиков. SolidWorks – разработка компании SolidWorks Corporation (США), система автоматизированного проектирования (САПР) в трехмерном измерении. Разработана специально для работ с 3D моделями. Обладает достаточно простым интерфейсом. Программа появилась в 1993 году и составила конкуренцию в области 3D моделирования таким продуктам как AutoCAD, Autodesk Mechanical Desktop, Solid Edge.

Твердотельная модель прожектора создавалась с помощью программы SolidWorks Version 2014. Для проведения анализа собственных частот конструкции прожектора использовался программный комплекс SolidWorks Simulation, входящий в пакет программного комплекса SolidWorks. SolidWorks Simulation является простой и мощной программой в использовании и с помощью решающих программ дает возможность быстро решать большие задачи.

С помошью программы SolidWorks Simulation можно проводить следующие анализы: статическое исследование, частотное исследование, исследование потери устойчивости, термическое исследование, исследование на ударную нагрузку, исследование усталости, нелинейное исследование, динамическое исследование, параметрическая оптимизация и расчет сосудов высокого давления.

SolidWorks Simulation для формирования расчетной модели использует геометрическую модель или сборку SolidWorks, а для проведения анализа используется метод конечных элементов. Метод конечных элементов является численным методом анализа конструкций; универсальным и пригодным для

работы на компьютерах. При использовании метода конечных элементов модель делится на малые части (создание сетки) с простыми формами (элементы), которые эффективно заменяют сложную задачу простыми. После создания расчетной сетки программа SW Simulation, учитывая соединения между элементами, разрабатывает уравнения, которые связывают реакцию с физическими свойствами материала, приложенной нагрузкой и ограничением. После этого программный пакет SW Simulation, создавая из уравнений большую систему совместных алгебраических уравнений, определяет неизвестные величины [38].

Для проведения расчета частот и форм собственных колебаний используется модуль «частотный анализ» системы SolidWorks Simulation.

Светодиод, как и любой другой электронный прибор, не обладает значением КПД 100%, а это значит, что часть потребляемой мощности преобразуется в тепло. Современные светодиоды обладают КПД порядка 40…50%, то есть в среднем 50…60% потребляемой мощности преобразуется в тепло. При проектировании световых приборов со светодиодными источниками света требуется проводить моделирование системы охлаждения или, проще говоря, тепловой расчет. Сейчас существует множество средств моделирования тепловых режимов электронный устройств: Flomerics Flotherm, ANSYS Icepack и др. В данной работе использовался модуль Flow Simulation, интегрируемый в систему SolidWorks. За счет полной интеграции Flow Simulation в SolidWorks инженер может моделировать геометрию и выполнять все расчеты и анализы, как говорится, «в одном окне». Это значительно снижает вероятность возникновения ошибок импорта/экспорта геометрии через промежуточный формат данных (например, SAT, IGES и т. д.).

Flow simulation – программное обеспечение, полностью интегрированное в SolidWorks для расчёта жидкостных и газовых потоков внутри и снаружи модели SolidWorks, а также рассчитывающее теплопередачу между моделями конвекцией,

излучением и теплопроводностью с помощью технологий вычислительной гидрогазодинамики (CFD). Математической основой является метод конечных объёмов. Реализована управляемая пользователем многопроцессорность и многоядерность при генерации расчетной сетки и работе решателя, последовательное выполнение проектов и одновременный расчёт выбранных двух. В состав семейства входит базовый пакет Flow Simulation и дополнительные прикладные модули Electronics Cooling Module и HVAC (Heat Ventilating Air Conditioning) Module.

Помимо автоматического построения расчетной сетки, что не всегда приводит к приемлемой точности результатов, в данном модуле присутствует и ручное задание сетки. Такой метод позволяет инженеру управлять концентрированностью сетки на мелких деталях исследуемой системы.

Еще одной особенностью Flow Simulation является то, что при назначении физических свойств моделей их можно импортировать из SolidWorks, имеющего обширные библиотеки материалов. Это значительно упрощает и ускоряет процесс моделирования, особенно в случае сложных систем со множеством объектов, обладающих различными тепловыми характеристиками.

В процессе вычислений для их контроля можно в реальном времени строить графики показаний датчиков, а также срезовые эпюры температур, давления, скоростей и т. д. Вычисление можно прерывать, сохраняя при этом промежуточный результат, что позволит продолжить расчет позже.

Для визуализации результатов расчета Flow Simulation обладает полным набором инструментов, ставшим уже стандартом для расчетных программ такого рода. В него входят срезовые и поверхностные эпюры, распределение результатов по потокам текучей среды (в нашем случае это воздух) и др. Кроме того, есть возможность экспорта полученных данных в формат Microsoft Excel, что позволяет использовать его математический аппарат для анализа полученного решения [39].

2.3 Выводы

1. Объектом работы являлась разработка лобового прожектора для локомотивов и его исследование.

2. Для светотехнического расчета было использовано программное обеспечение LightTools. Твердотельная модель прожектора создавалась с помощью программы SolidWorks. Тепловой расчет был проведен в модуле Flow Simulation, интегрируемом в систему SolidWorks. Для проведения анализа собственных частот конструкции прожектора использовался программный комплекс SolidWorks Simulation.

Глава 3. Проектирование светодиодного прожектора для локомотивов

3.1 Расчет оптической системы прожектора

Зная необходимую силу света и уровень потерь, можно определить необходимое количество светодиодов для осветительной системы. Следует учесть, что для достижения требуемых энергетических характеристик необходимо для каждого светодиода использовать отдельный отражатель. Источник света – светодиод – имеет достаточно большой угол расходимости - 2θ = 120°. Задача отражателя, устанавливаемого на светодиод, собрать световой поток в пределах требуемого угла.

3.1.1 Оптическая система со светодиодами XHP35

Для использования в прожекторе были выбраны светодиоды с максимальной светоотдачей, цвет излучения – белый: светодиоды XHP35 фирмы CREE (USA). При максимальном рабочем токе ($I_{max} = 1050$ мА) и достаточном охлаждении (при температуре перехода 25 °C) световой поток этих светодиодов достигает 1833 лм. Цветовая температура лежит в интервале 5500 - 8300К. Кроме того эти светодиоды отличаются устойчивостью к деградации при повышении температуры кристалла. Мощность светодиода 13 Вт, размер 3,45 х 3,45 мм. На рисунке 3.1 приведено распределение силы света светодиода XHP35.

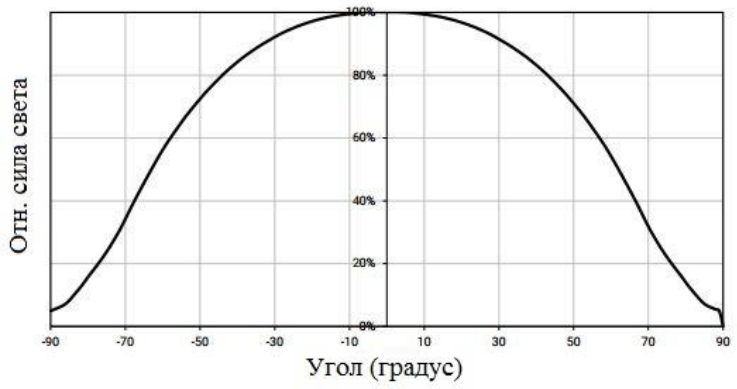


Рисунок 3.1 – Распределение силы света светодиода XHP35

На рисунке 3.2 изображена зависимость величины относительного светового потока от температуры для светодиодов серии XHP 35 компании CREE. Как видно из графика, с увеличением температуры перехода светодиода величина светового потока уменьшается, и наоборот – при хорошем охлаждении поток возрастает [40].

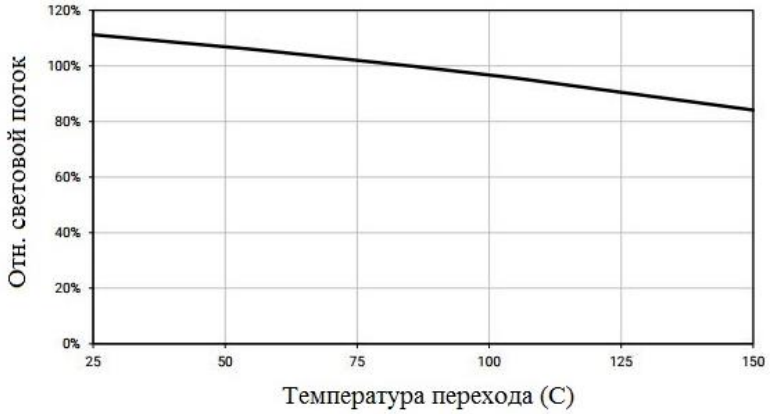


Рисунок 3.2 – Зависимость относительного светового потока от температуры перехода светодиода XHP 35

Для выполнения требований по силе света проведены расчеты в программном пакете LightTools. Необходимо с учетом потерь в приборе

использовать 12 светодиодов XHP 35. На рис. 3.3 представлена компоновка прожектора на 12 светодиодах с индивидуальными отражателями. При этом светодиоды жестко установлены в фокусе этого параболоида вращения.

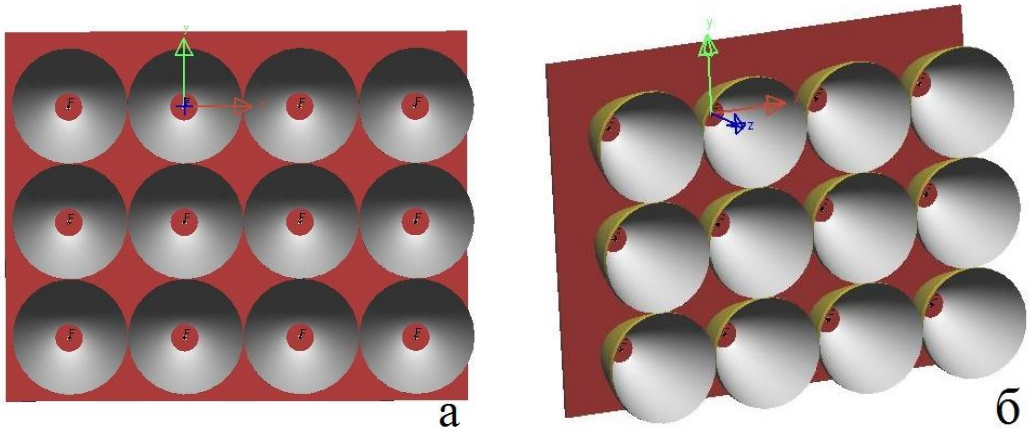


Рисунок 3.3 – Компоновка прожектора со светодиодами XHP 35:
а) вид спереди; б) вид сбоку

На рисунке 3.4 приведен вид отдельного светодиода с параболоидным отражателем. Габаритные размеры одиночного отражателя: диаметр 100 мм, длина 100 мм. Фокусное расстояние параболоида равно 6 мм. При этом без учета используемого радиатора габаритные размеры оптической системы прожектора на 12 светодиодах составляют (В х Д х Ш): 400 х 300 х 100 мм.

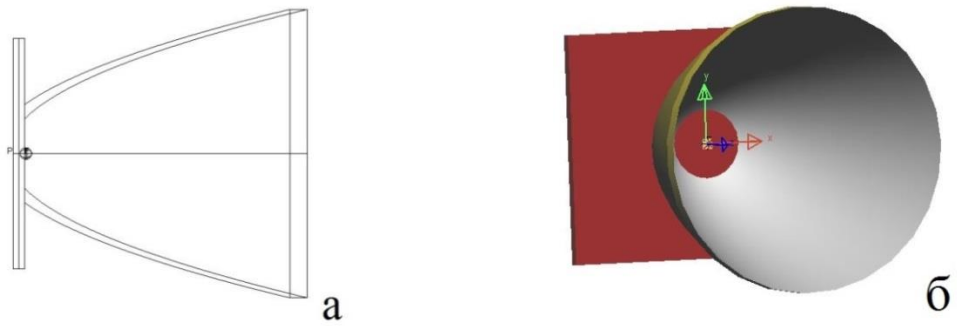


Рисунок 3.4 – Отдельный светодиод с параболоидным отражателем:
а) вид справа; б) вид сбоку

Одиночный светодиод, снабженный отражателем параболоидной формы, имеет характеристику силы света, представленную на рис. 3.5. Угол расходимости составляет около 3° (по уровню силы света 0,5). Расчет проводился при потоке светодиода 1833 лм с учетом потерь в системе.

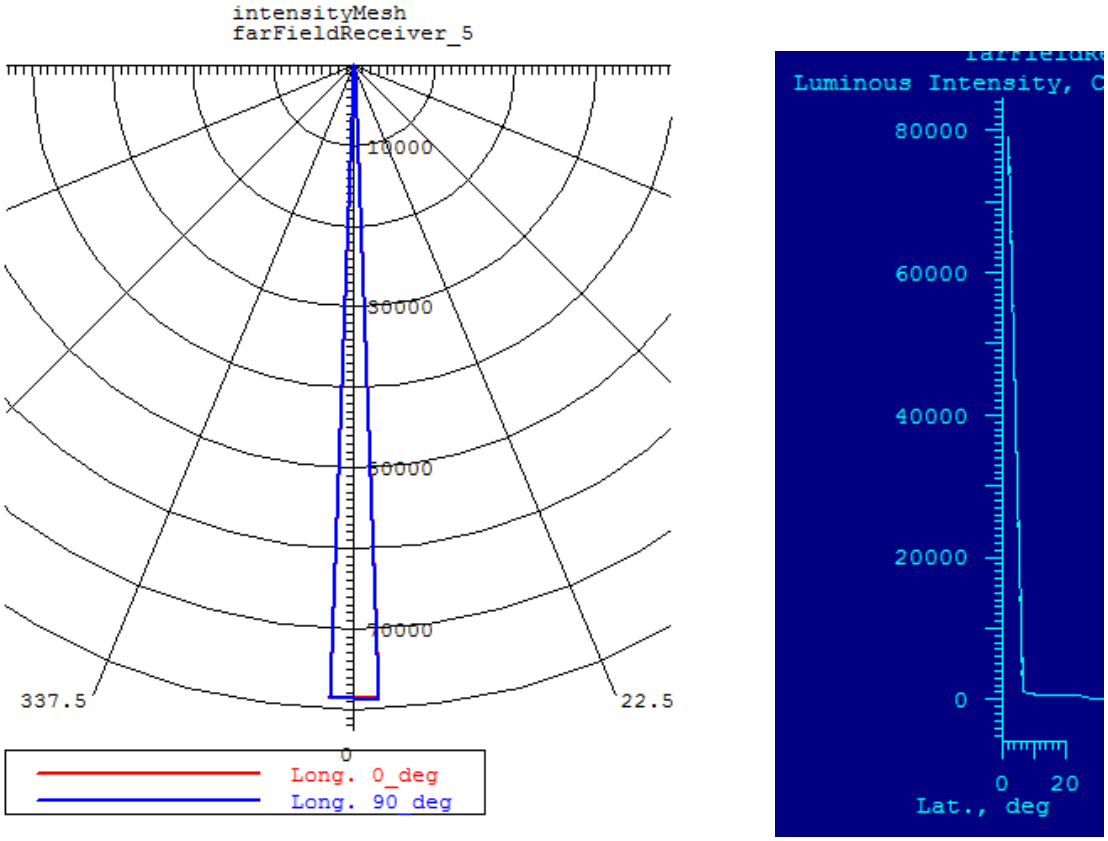


Рисунок 3.5 – КСС для одиночного светодиода с зеркальным параболоидом

Было выполнено моделирование оптической части прожектора в целом. На рис. 3.6 приведен график характеристики кривой силы света для прожектора из 12 светодиодов с отражателями с учетом потерь. Осевая сила света достигает необходимого значения и равна 950 000 кд. Расчет проводился при потоке каждого светодиода 1833 лм.

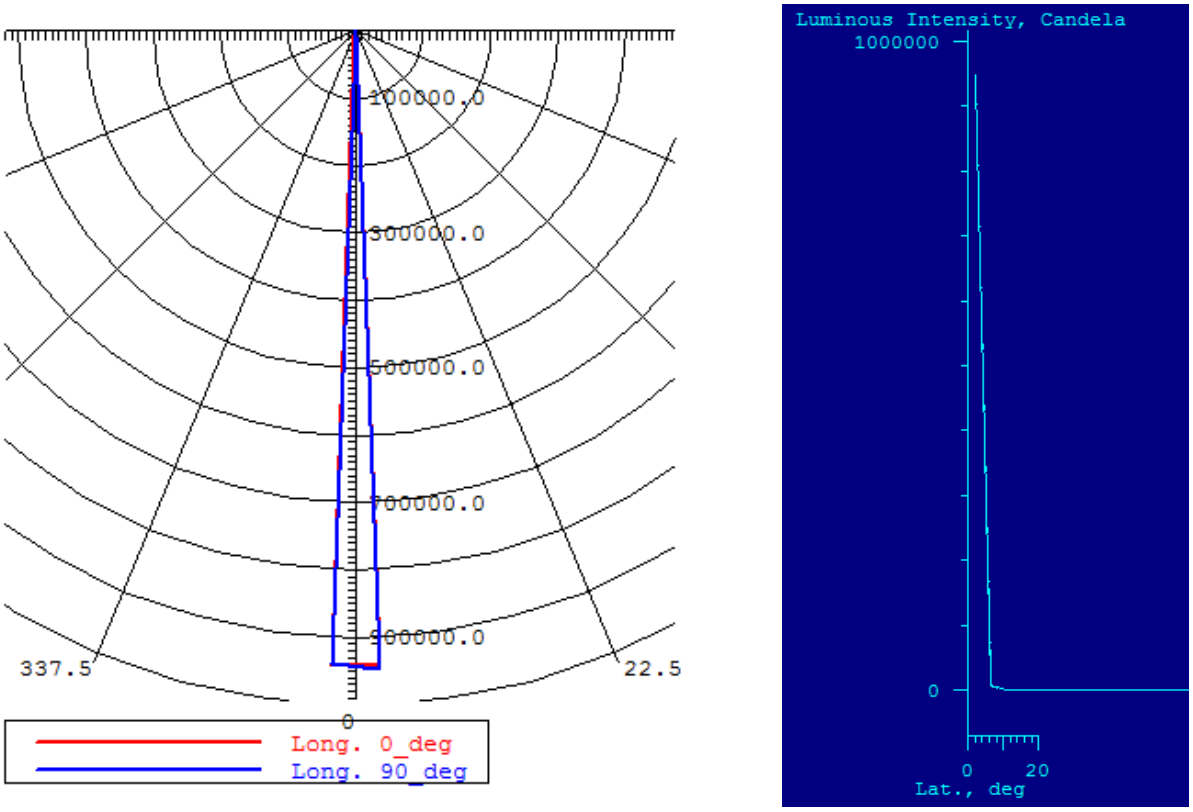


Рисунок 3.6 – КСС смоделированного прожектора со светодиодами XHP 35

Здесь под потерь света подразумеваются потеря при отражении от стенки параболоида, учитывая коэффициент отражения алюминия, потеря из–за нехватки угла охвата отражателя, которые составляют в нашем случае 8% и 14% соответственно. А также учитывалась потеря при проходе светового пучка через стекло корпуса 8% (при нормальном падении света). Такой вид потерь возникает в результате френелевского отражения светового пучка на границе раздела сред «воздух – стекло».

На рисунке 3.7 показана зависимость коэффициента отражения алюминия от длины волны [41].

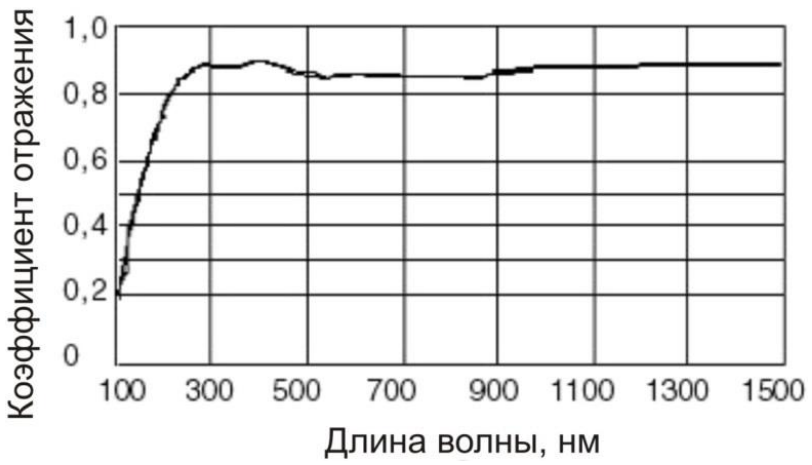


Рисунок 3.7 – Зависимость коэффициента отражения алюминия от длины волны

На расстоянии 10 м от защитного стекла прожектора размещаем светлый щит, на котором должен быть четко нанесен круг диаметром 1000 мм. Угол рассеяния на уровне половины силы света можно определить анализируя освещенность на щите (рис. 3.8). Угол рассеяния на уровне половины силы света составляет около 3°. При этом мощность потребления предложенной оптической системы равна $12 \cdot 13$ Вт $= 156$ Вт.

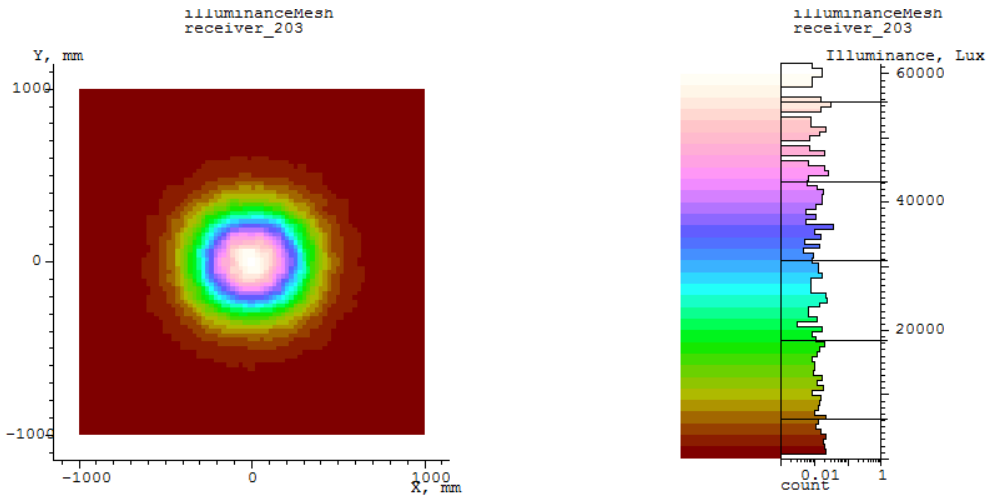


Рисунок 3.8 – Освещенность на щите на расстоянии 10 м от прожектора

3.1.2 Оптическая система со светодиодами XQ–E

Проведено моделирование оптической системы при использовании светодиодов XQ–E от фирмы CREE (USA). Характеристики данного светодиода приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Характеристика светодиода XQ-E [42]

Мощность, Вт	3
Световой поток, лм	334
Световая отдача, лм/Вт	111
Размер, мм	1,6 x 1,6

Для выполнения требований по силе света проведены расчеты. Необходимо с учетом потерь в приборе использовать 64 светодиодов XQ-E. Компоновка светодиодного прожектора показана на рисунке 3.9.

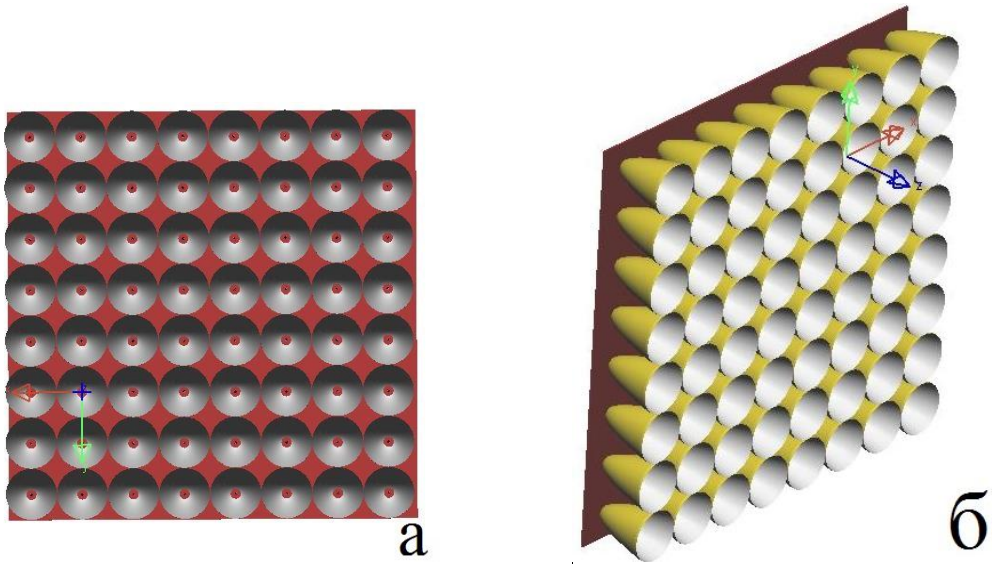


Рисунок 3.9 – Компоновка прожектора со светодиодами XQ-E:
а) вид спереди; б) вид сбоку

Габаритные размеры одиночного отражателя: диаметр 50 мм, длина 60 мм. При этом без учета используемого радиатора габаритные размеры оптической

системы прожектора на 64 светодиодах составляют (В х Д х Ш): 400 х 400 х 60 мм.

На рис. 3.10 приведен график характеристики кривой силы света для прожектора из 64 светодиодов с отражателями с учетом потерь. Осевая сила света достигает необходимого значения и равна 980 000 кд, при этом угол рассеяния на уровне половины силы света составляет около 3°. Расчет проводился при потоке каждого светодиода 334 лм. Общая мощность такой оптической системы составляет 192 Вт.

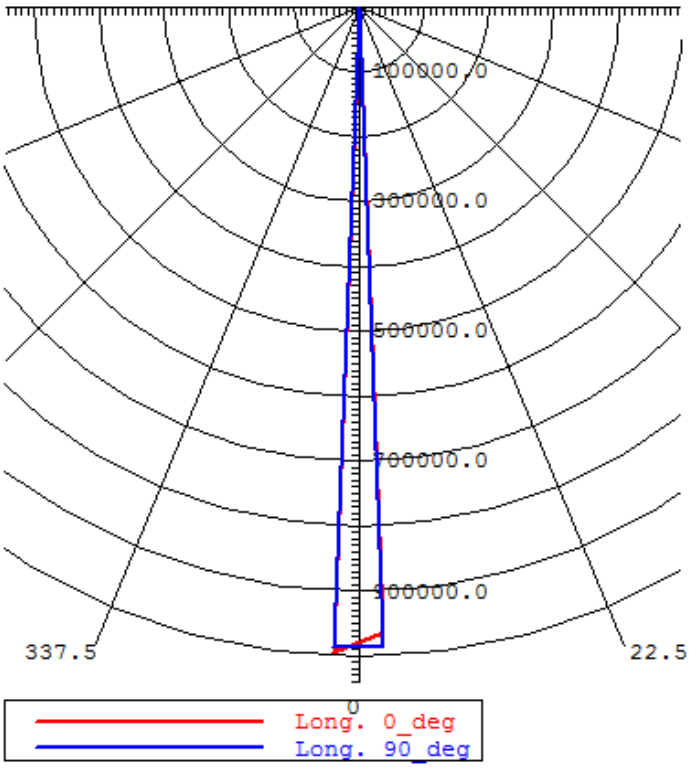


Рисунок 3.10 – КСС смоделированного прожектора со светодиодами XQ-E

Освещенность на щите на расстоянии 10 м от прожектора показана на рисунке 3.11.

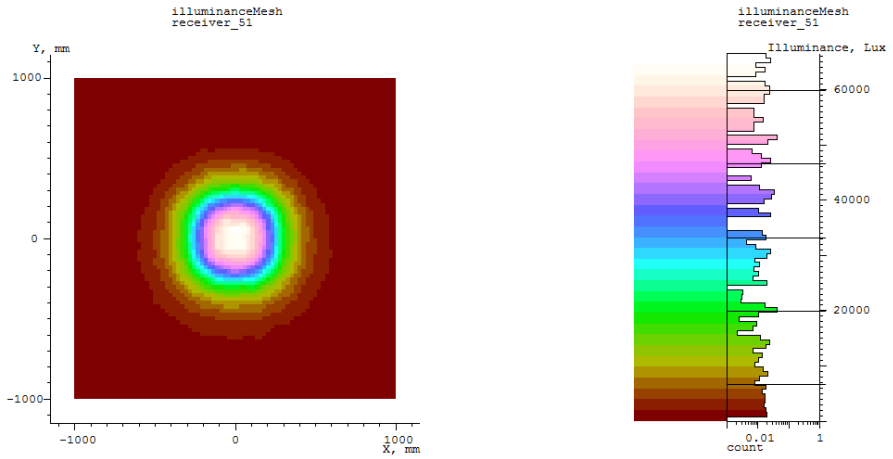


Рисунок 3.11 – Освещенность на щите на расстоянии 10 м от прожектора

Результаты моделирования подтверждают, что при использовании светодиодов XHP-35 и XQ-E достигается необходимая осевая сила света и ширина пучка. Параболоидный отражатель в свою очередь обеспечивает требуемые характеристики прожектора и является достаточно технологичным. В результате сравнения полученных характеристик двух вариантов смоделированной оптической системы выбрана система со светодиодами XHP-35, так как она потребляет меньше мощности и обладает меньшим габаритным размером.

3.2 Расчет системы охлаждения

Потребляемая мощность используемого светодиода XHP35 равна 13 Вт. По рекомендации компании CREE при расчете следует допускать, что приблизительно 75% потребляемой мощности преобразуется в тепло ($0{,}75 \cdot 13\text{Вт} = 9{,}75$ В т). Тогда общая тепловая мощность прожектора, которую требуется рассеивать, составляет $12 \cdot 9{,}75 = 117$ Вт.

3.2.1 Пассивное охлаждение

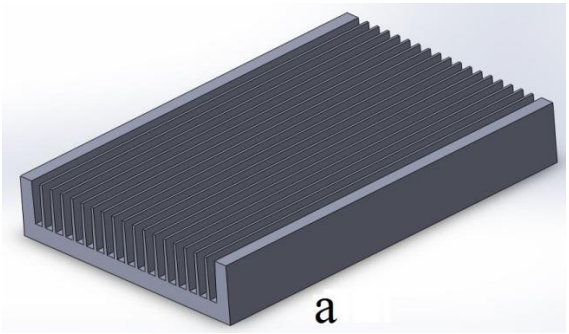
Для отвода тепла от светодиодов были выбраны два алюминиевых радиатора с профилем АВ9010 и АВ 9029 вытяжкой на 300 мм. Материал радиаторов – сплав АД31 ГОСТ 4784-97 [43].

К преимуществам конструкций, изготовленных из алюминиевых сплавов АД31, относится: высокая прочность при удельно низком весе, хорошие звукоизоляционные свойства, большой срок службы, устойчивость к коррозии, пластичность, красивый внешний вид, простота обслуживания, не требует особого ухода, возможность изготовления сложных конструкций.

Таблица 6 – Характеристика сплава АД 31[44]

Коэффициент теплопроводности, $Вт/(м \cdot °C)$	188
Удельная теплоемкость, $Дж/(кг \cdot °C)$	921
Массовая плотность, $кг/м^3$	2710
Коэффициент температурного (линейного) расширения, $1/°C$	$2{,}34 \cdot 10^{-5}$

а) Тепловой расчет с радиатором АВ9010



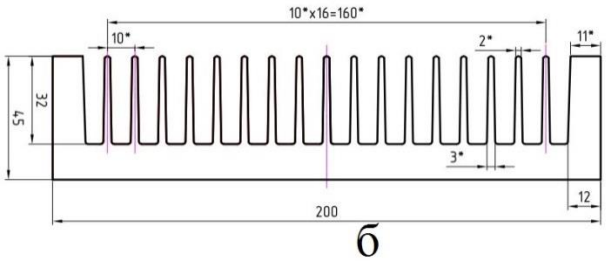


Рисунок 3.12 – Алюминиевый радиатор АВ9010:

а) 3D модель; б) Чертеж

Твердотельная модель прожектора с двумя радиаторами охлаждения AB9010 представлена на рис. 3.13.

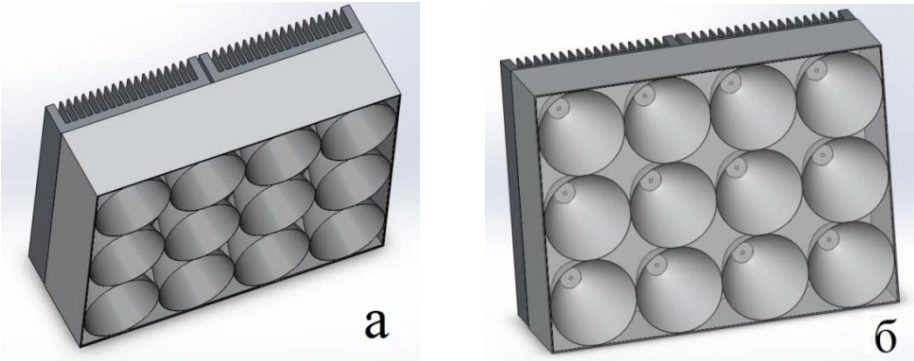


Рисунок 3.13 – Твердотельная модель прожектора:
а) вид сбоку; б) вид спереди

На рисунках 3.14 и 3.15 представлено распределение температурного поля на плоскости, проходящей через светодиоды. Тепловой расчет проведен при температуре *20* ℃ окружающей среды в программной среде SolidWorks Flow Simulation. Результаты компьютерного моделирования показали, что максимальная температура печатной платы светодиода составляет 60,2 ℃.

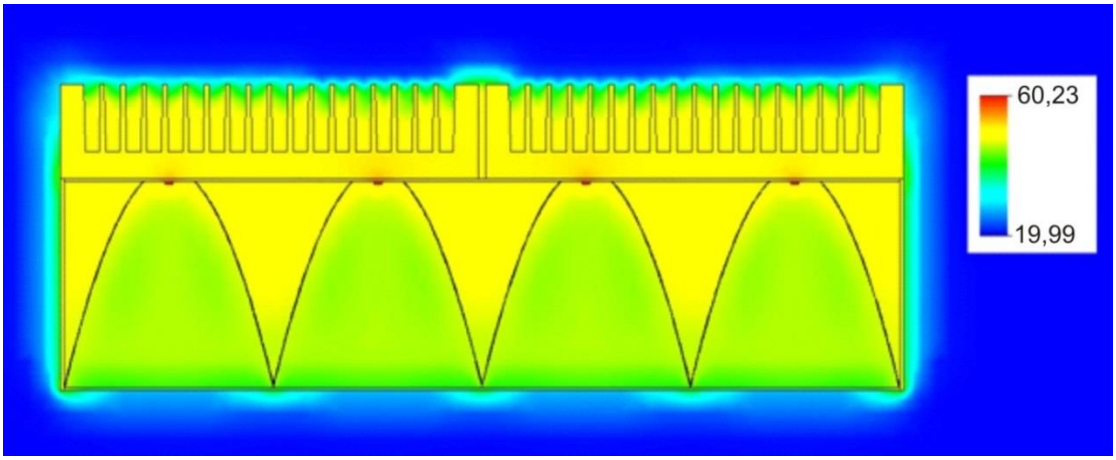


Рисунок 3.14 – Распределение температурного поля при температуре окружающей среды 20 ℃

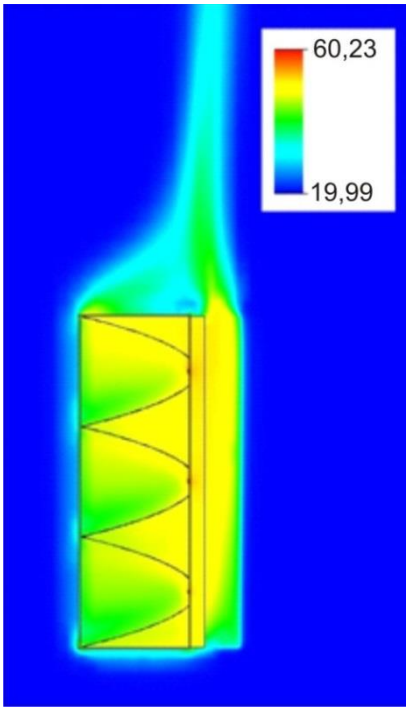


Рисунок 3.15 – Распределение температурного поля при температуре окружающей среды 20 ℃

При температуре окружающей среды 40 ℃ максимальная температура печатной платы светодиода составляет 81,4 ℃.

А также был проведен тепловой расчет при использовании радиатора AB 9010 со щитом для исследования влияния щита на охлаждение. (рис. 3.16). Расчет показал, что при температуре окружающей среды 40 ℃ температура печатной платы светодиодов составила 78,4 ℃. Температура снизилась всего лишь на 3 ℃ после добавления радиатору щита.

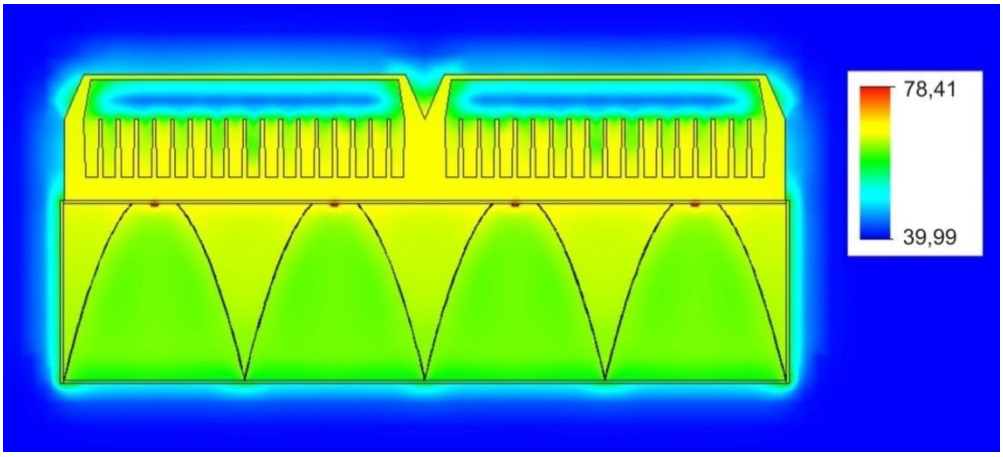


Рисунок 3.16 – Эпюра распределения температуры
(радиатор АВ 9010 со щитом)

б) Тепловой расчет с радиатором АВ9029

Алюминиевый радиатор профилем АВ9029 с волнистыми ребрами и вытяжкой на 300 мм показан на рисунке 3.17. Материал радиатора - сплав АД31 ГОСТ 4784-97.

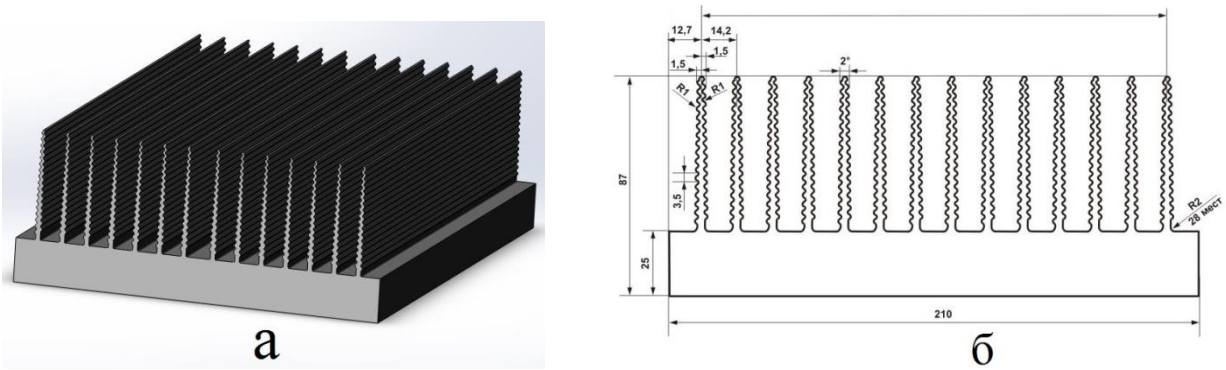


Рисунок 3.17 – Алюминиевый радиатор АВ9029:
а) 3D модель; б) Чертеж

Были проведены тепловые расчеты при температурах окружающей среды 20 ℃ и 40 ℃. Распределение температурного поля при температуре окружающей

среды 40 ℃ имеет вид, показанный на рисунке 3.18. Максимальная температура печатной платы светодиода составляет 69,8 ℃. А при температуре 20 ℃ окружающей среды она равна 49,1 ℃.

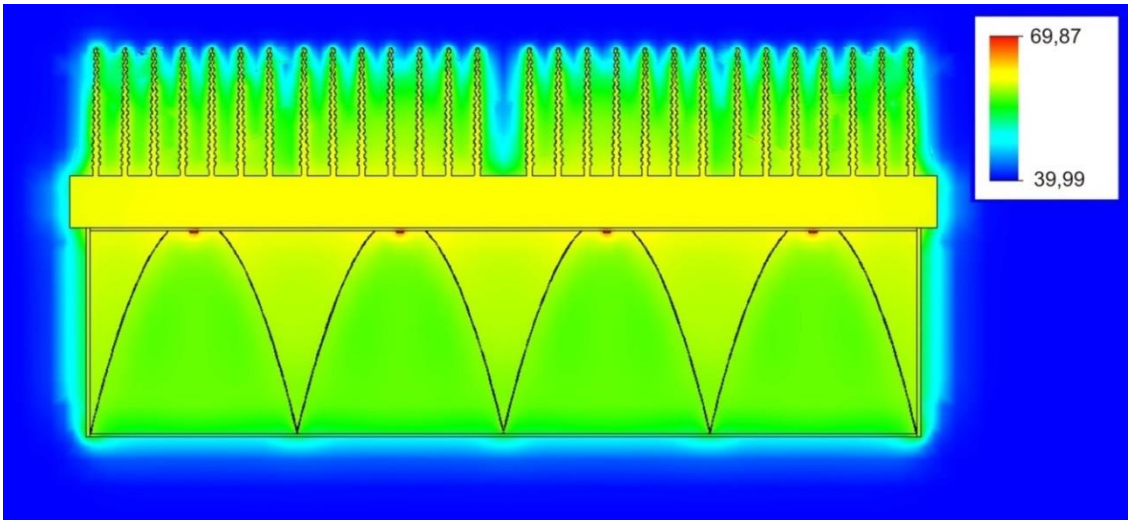


Рисунок 3.18 – Эпюра распределения температуры при температуре окружающей среды 40 ℃

3.2.2 Принудительное охлаждение

Для более эффективного охлаждения прожектора было проведено моделирование системы охлаждения при использовании четырех разных вентиляторов: Ebm papst 4606 N, Ebm papst 3806, Ebm papst 414 JH, Sunon PMD 1238 PQB1-A. Они отличаются друг от друга мощностью, габаритным размером и потоком воздуха.

а) Охлаждение вентилятором ebm papst 4606 N

Для отвода горячего воздуха от радиатора была создана геометрически упрощенная модель вентилятора фирмы Ebm Papst 4606N. На рис. 3.19 приведены чертеж вентилятора и его упрощенная модель. Как видно, модель состоит из небольшого прямоугольного параллелепипеда, служащего указанием габаритов корпуса вентилятора, и полого цилиндра, указывающего на область, от которой

непосредственно идет воздух (ведь от узла, к которому прикреплены лопасти, по большому счету воздух не поступает). Мы опустили глубину вентилятора, так как в данном случае она не играет роли. Все характеристики вентилятора задаются напрямую в самом модуле Flow Simulation.

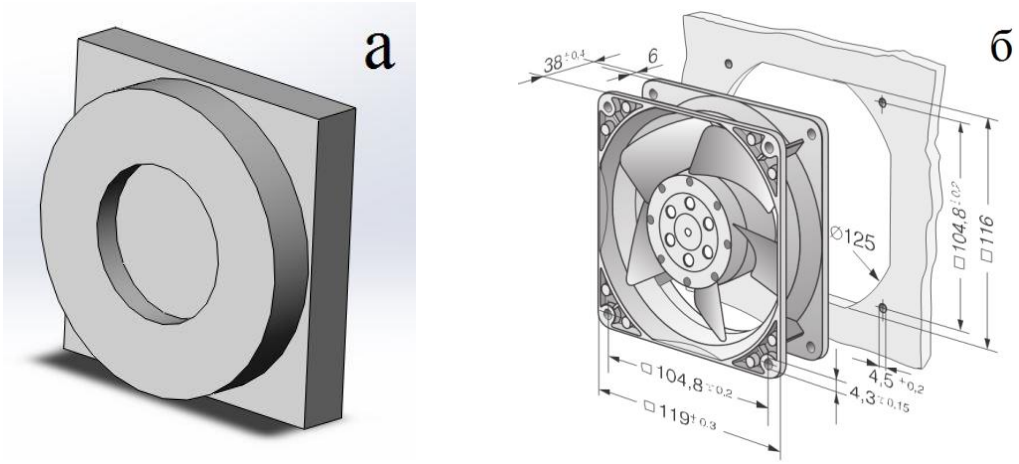


Рисунок 3.19 – а) Упрощенная 3D модель; б) Чертеж вентилятора ebm papst 4606 N

В качестве материала для вентиляторов задается пластик PBT общего назначения. Одной из важнейших характеристик вентиляторов является зависимость разности давлений от потока воздуха вентилятора, обычно задаваемая графиком. На рис. 3.20 показан график такой зависимости вентилятора Ebm Papst 4606N, предоставленный производителем вентилятора и заданный в модели.

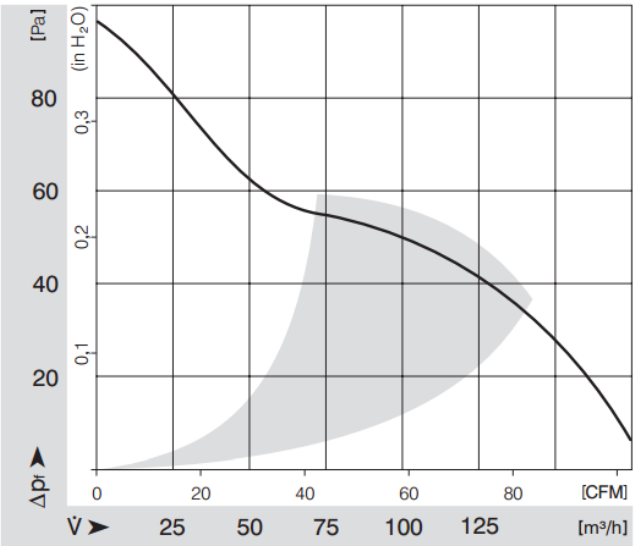


Рисунок 3.20 – Зависимость разности давлений от потока воздуха вентилятора Ebm Papst 4606N

Таблица 7 – Характеристики вентилятора Ebm Papst 4606N [45]

Номинальное напряжение, В (переменное)	115
Частота питающей сети, Гц	60
Частота вращения, $мин^{-1}$	3100
Потребляемая мощность, Вт	18
Минимальная температура окружающей среды, °С	-40
Максимальная температура окружающей среды, °С	90
Размер, мм	119x119x38

Вентиляторы, установленные под радиаторами, обдувая их ребра отводят горячий воздух в атмосферу. Поскольку размеры вентиляторов типа Ebm Papst 4606N и Ebm papst 3806 больше чем размеры ребер радиатора AB9010, в корпусе прожектора проделаны щели (рис. 3.21). Эти щели позволяют улучшать циркуляцию воздуха и охлаждать отражателей непосредственно. В качестве охладителя был выбран алюминиевый радиатор с профилем AB9010, длиной 300 мм. Материал радиатора - сплав АД31 ГОСТ 4784-97.

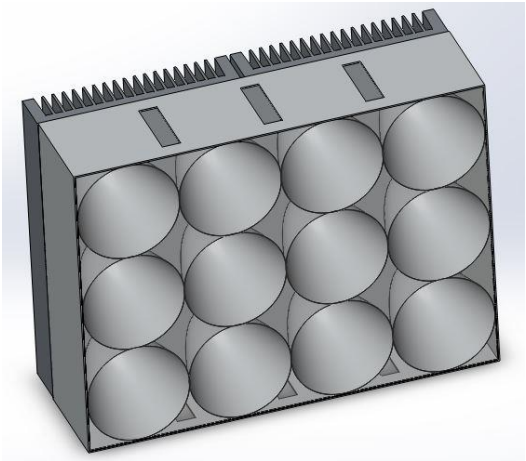


Рисунок 3.21 – 3D модель прожектора с щелями в корпусе

Распределение температурного поля, полученное в результате теплового расчета при температуре окружающей среды 40 ℃ приведено на рисунках 3.22 и 3.23. Максимальная температура печатной платы светодиода составляет 64,8 ℃. При расчете использовалось два вентилятора. Каждый находится под отдельным радиатором. Результаты расчета при температуре окружающей среды 20 ℃ показали, что температура печатной платы светодиода составила 44,7 ℃.

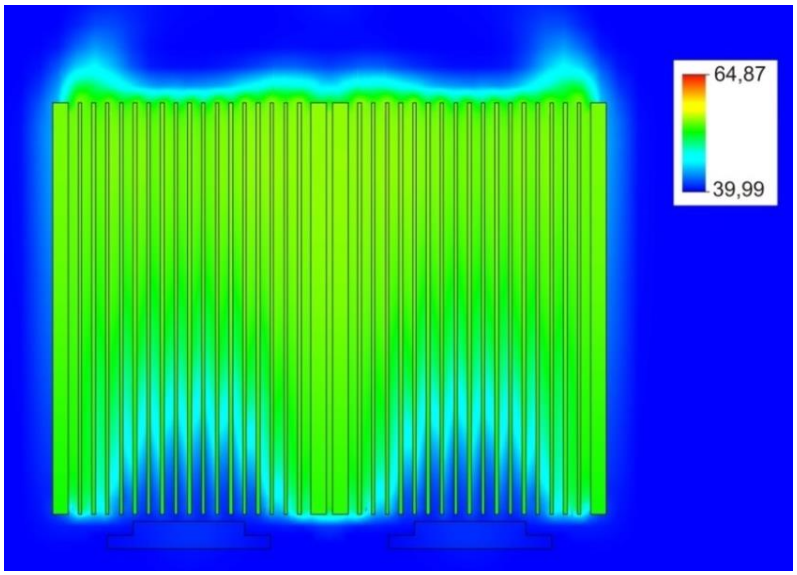


Рисунок 3.22 – Эпюра распределения температуры на радиаторе при температуре окружающей среды 40 ℃ (вид сзади)

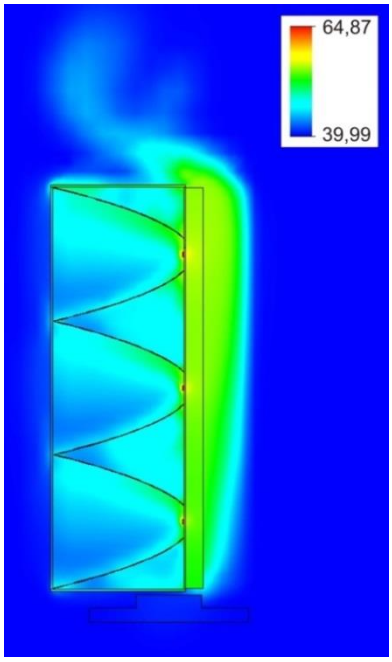


Рисунок 3.23 – Эпюра распределения температуры при температуре окружающей среды 40 ℃ (вид сбоку)

б) Охлаждение вентилятором Ebm papst 414 JH

Для охлаждения использовалось четыре вентилятора Ebm papst 414 JH. Мощность каждого вентилятора составляет 3 Вт. В данном случае в корпусе щели не проделаны, поскольку размер вентилятора сопоставим с размером ребра радиатора. В качестве охладителя был выбран алюминиевый радиатор с профилем AB9010, длиной 300 мм. Материал радиатора – сплав АД31 ГОСТ 4784-97. На рисунке 3.24 приведены зависимость разности давлений от потока воздуха и чертеж вентилятора Ebm papst 414 JH.

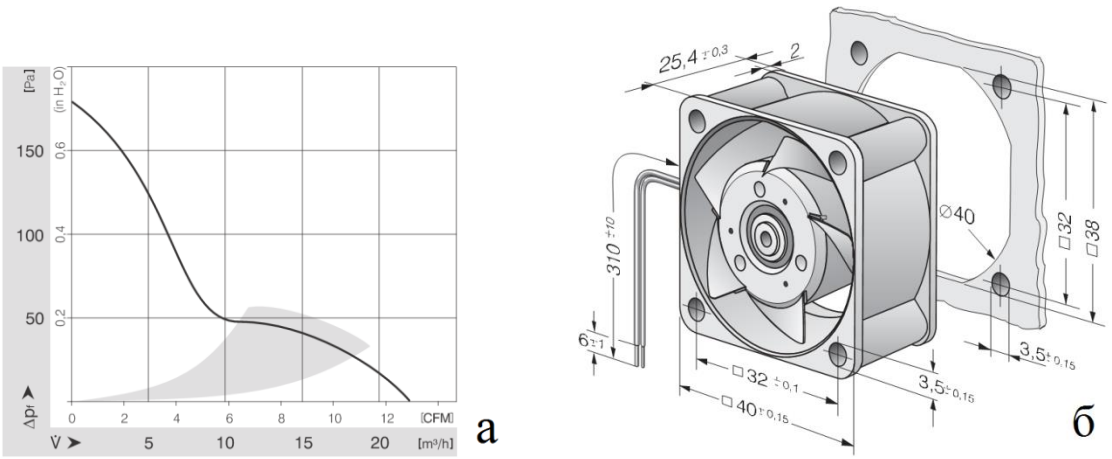


Рисунок 3.24 – а) Зависимость разности давлений от потока воздуха; б) Чертеж вентилятора Ebm papst 414 JH

Основные характеристики данного вентилятора представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Характеристики вентилятора Ebm papst 414 JH [46]

Номинальное напряжение, В (постоянное)	24
Частота вращения, $мин^{-1}$	11700
Потребляемая мощность, Вт	3
Минимальная температура окружающей среды, ℃	-40
Максимальная температура окружающей среды, ℃	+70
Размеры, мм	40x40x25
Воздушный поток, $м^3$/час	22
Масса, кг	0,050
Подшипник	шариковый
Наработка при 40 °C	60000 ч
Наработка при 70 °C	30000 ч
Степень защиты	IP 20/IP 54

Распределение температурного поля на плоскости, проходящей через вентиляторы и ребра радиатора имеет вид, приведенный на рисунке 3.25. Результаты теплового расчета при температуре окружающей среды 40 ℃ показали, что максимальная температура печатной платы светодиода равна 71 ℃. А также на рисунке 3.26 показано распределение скорости потока воздуха.

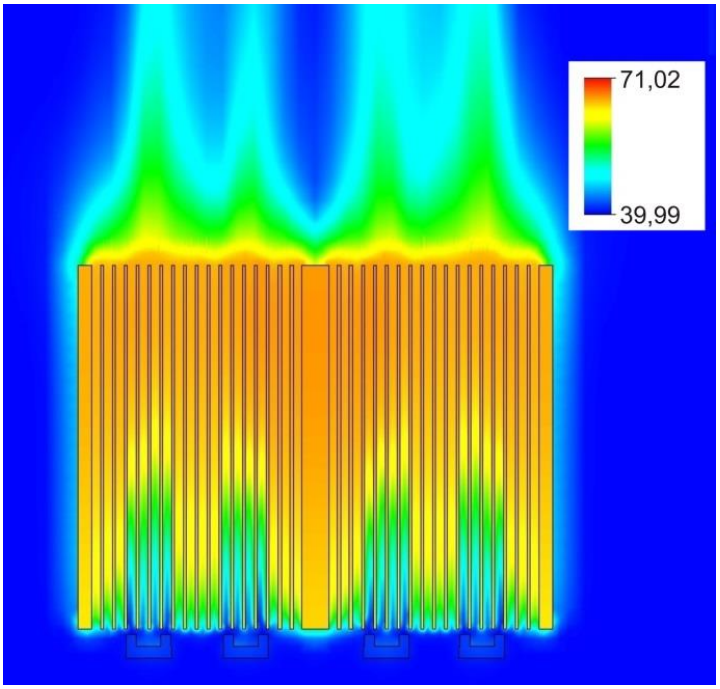


Рисунок 3.25 – Эпюра распределения температуры на радиаторе при температуре окружающей среды 40 ℃ (Ebm papst 414 JH)

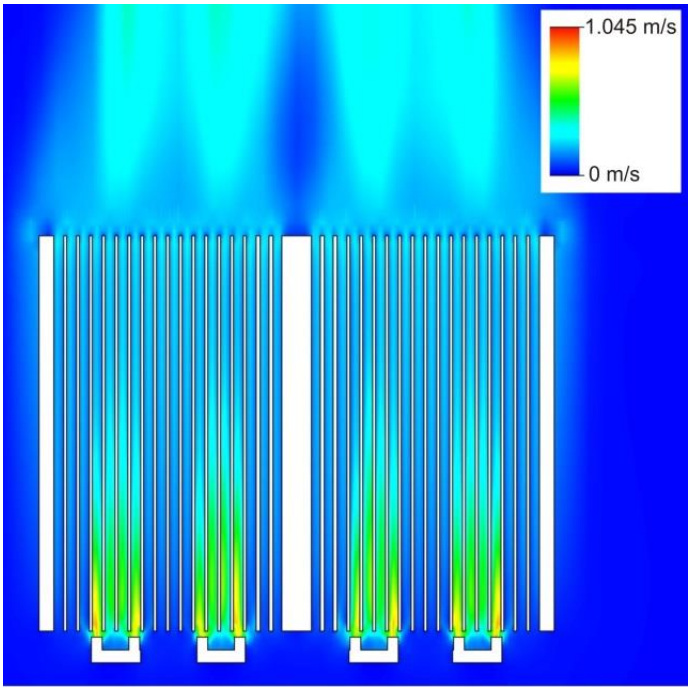


Рисунок 3.26 – Эпюра распределения скорости потока воздуха на радиаторе (Ebm papst 414 JH)

в) Охлаждение вентилятором Sunon PMD 1238 PQB1-A

На рис. 3.27 б показан график воздушного потока вентилятора Sunon PMD 1238 PQB1-A, предоставленный производителем вентилятора и заданный в модели. В качестве охладителя был выбран алюминиевый радиатор с профилем AB9010, длиной 300 мм. Материал радиатора - сплав АД31 ГОСТ 4784-97.

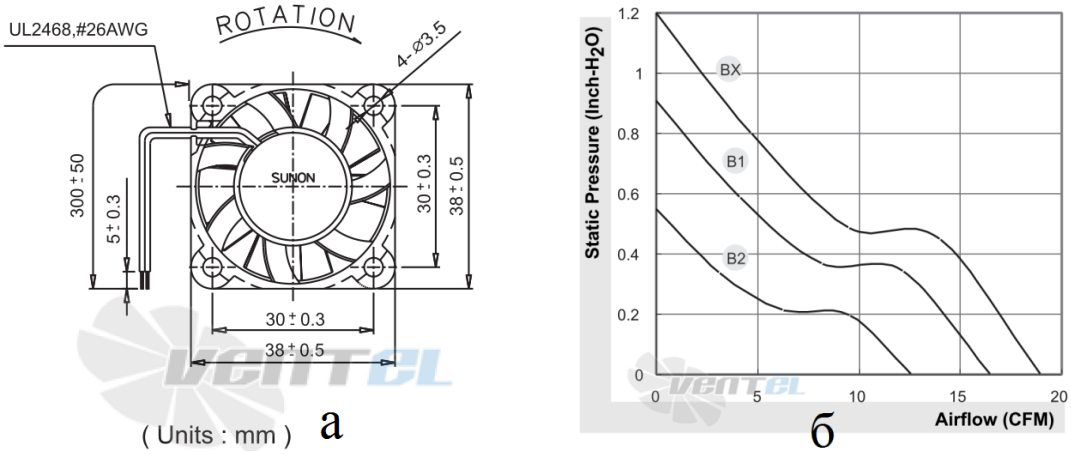


Рисунок 3.27 – а) Чертеж вентилятора; б) Зависимость разности давлений от потока воздуха вентилятора Sunon PMD 1238 PQB1-A

Таблица 9 – Характеристики вентилятора Sunon PMD 1238 PQB1-A [47]

Номинальное напряжение, В (постоянное)	12
Вес, г	35,2
Частота вращения, $мин^{-1}$	13000
Потребляемая мощность, Вт	3,6
Минимальная температура окружающей среды, ℃	-40
Максимальная температура окружающей среды, ℃	+70
Размеры, мм	38x38x28
Воздушный поток, $м^3$/час	28,05

Результаты теплового расчета при температуре окружающей среды 40 ℃ при использовании вентилятора Sunon PMD 1238 PQB1-A для охлаждения, показаны на рисунках 3.28 и 3.29. Расчет показал, что максимальная температура

печатной платы светодиода составила 66 ℃. Для охлаждения использовалось четыре вентилятора данной модели.

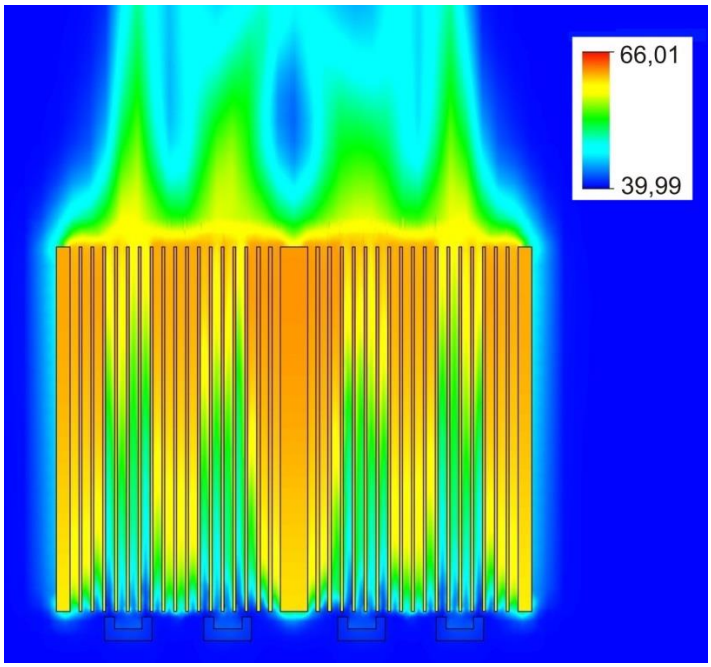


Рисунок 3.28 – Эпюра распределения температуры на радиаторе при температуре окружающей среды 40 ℃ (Sunon PMD 1238 PQB1-A)

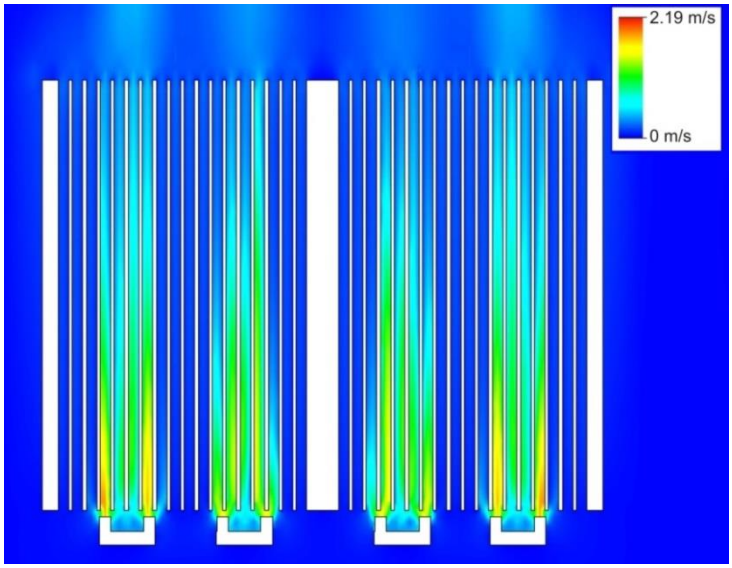


Рисунок 3.29 – Эпюра распределения скорости потока воздуха на радиаторе (Sunon PMD 1238 PQB1-A)

Результаты проведенных тепловых расчетов для сравнения эффективности использованных вентиляторов, а также значения осевой силы света прожектора при различных температурах светодиода приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Результаты тепловых расчетов

№	Модель вентилятора	Мощность вентилятора	Кол. вентиляторов	Температура светодиодов при $T_{ок}$= 20 °C		Температура светодиодов при $T_{ок}$= 40 °C	
					Сила света		Сила света
1	Без вентилятора	-	-	60, 2 °C	818 800 кд	81,4 °C	782 000 кд
2	Ebm papst 3806	8 Вт	2	51 °C	832 600 кд	71,7 °C	798 600 кд
3	Ebm papst 4606 N	18 Вт	2	44,7 °C	840 800 кд	64,8 °C	809 600 кд
4	Ebm papst 414 JH	3 Вт	4	50 °C	834 440 кд	71 °C	800 400 кд
5	Sunon PMD 1238 PQB1-A	3,6 Вт	4	45,5°C	839 040 кд	66°C	806 840 кд

В результате анализа и сравнения полученных данных можно заключить, что оптимальной системой охлаждения является система «радиатор AB9010 с четырьмя вентиляторами Sunon PMD 1238 PQB1-A», так как она обеспечивает низкую температуру светодиодов из всех возможных вариантов, при этом обладает низкой потребляемой мощностью. Для дальнейшей разработки и исследования конструкции прожектора выбрана данная система охлаждения.

Улучшенный теплоотвод и используемая оптическая система позволяют существенно увеличить максимально допустимые токи, протекающие через светодиоды и повысить их светоотдачу, а также сформировать узкоградусный световой поток с высоким значением осевой силы света.

3.3 Электрическая часть прожектора

Светодиоды разделены на две независимые группы, в каждой группе последовательно включено по шесть светодиодов. При этом каждая группа питается отдельным драйвером. Тогда требуется два драйвера светодиодов с необходимыми характеристиками.

Необходимо подключить цепь из шести штук мощных светодиодов XHP–35 13Вт белого свечения к переменной сети согласно ГОСТ 29322-92 [48], 220 В, 50 Гц. Падение напряжения на одном белом светодиоде составляет в среднем 12,38 В. Ток, протекающий в цепи, должен быть стабилизирован в пределах 1000 – 1050 мА (для светодиодов 13 Вт). На рисунке 3.30 показан ВАХ для светодиода XHP–35 [40].

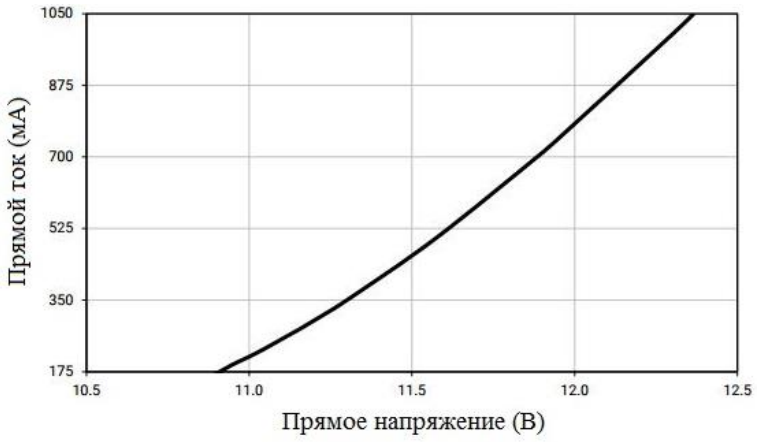


Рисунок 3.30 – Вольт-амперная характеристика для светодиода XHP–35

Далее складываем падения напряжений всех светодиодов в цепи или просто умножаем: $12{,}38\ \text{В} \cdot 6\text{шт} = 74{,}3\ \text{В}$.

После проведенных расчетов можно сделать вывод, что необходим драйвер светодиода у которого диапазон выходного напряжения охватывает значение 74,3 В, а выходной ток находится в пределах 1000 – 1050 мА.

Наиболее подходящий драйвер это диммируемый блок питания ARJ-DALI-100 с максимальной выходной мощностью 100 Вт и управлением DALI (рис.3.31). Технические характеристики блока питания приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Технические характеристики драйвера ARJ-DALI-100 [49]

Входное напряжение, В (переменное)	110 – 240
Выходное напряжение, В (постоянное)	20 – 85
Выходная мощность, Вт макс	100
Выходной ток, А	0,9 – 2,1
Степень защиты	IP 20
Размеры, мм	196x75x40
Рабочая температура, °С	-40..+40
Особенность	Диммируемый
Тип связи пульт/контроллер	Проводной

Рисунок 3.31 – Диммируемый блок питания ARJ-DALI-100

Электронная схема диммирования позволяет осуществлять плавное регулирование осевой силы света прожектора. Это очень удобно при обеспечении двух режимов включения прожектора (яркий и тусклый свет по ГОСТ 12.2.056–81 [4]). Особенностью такого варианта является дороговизна.

Для питания светодиодов можно использовать и другие блоки питания. В этом варианте светодиоды разделены на четыре независимые группы. Каждая группа питается отдельным драйвером. Количество светодиодов в отдельной группе, а также питающие их соответствующие драйвера приведены в таблице 12.

Таблица 12 – Группы светодиодов и питающие их драйвера

	Количество светодиодов в группе	Блок питания
1–группа	4	LAP601050M
2–группа	4	LAP601050M
3–группа	2	Arlight ARJ-KE401050A
4–группа	2	Arlight ARJ-KE401050A

Первая и вторая группы питаются блоком питания LAP601050M, а третья и четвертая драйвером Arlight ARJ-KE401050A. Технические характеристики данных блоков питания приведены в таблицах 13 и 14.

Таблица 13 – Технические характеристики блока питания LAP601050M [50]

Входное напряжение, В (переменное)	100 – 240
Выходное напряжение, В (постоянное)	30 – 60
Мощность, Вт	63
Выходной ток, мА	1050
Степень защиты	IP 65
Размеры, мм	162x42x30
Рабочая температура, °С	-30+50

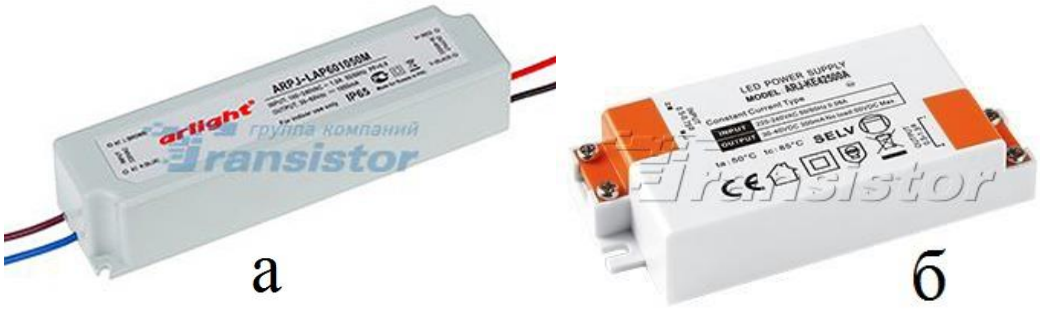


Рисунок 3.32 – а) Блок питания LAP601050M; б) Arlight ARJ-KE401050A

Таблица 14 – Технические характеристики блока питания Arlight ARJ-KE401050A [51]

Входное напряжение, В (переменное)	110 – 240
Выходное напряжение, В (постоянное)	30 – 40
Мощность, Вт	42
Выходной ток, мА	1050
Степень защиты	IP 20
Размеры, мм	117x42x24
Рабочая температура, °С	-30+50

В данном предложенном варианте для переключения в режим «тусклый свет» необходимо выключить питание всех групп кроме 3 или 4 группы. В таком режиме работает только два светодиода обеспечивая требуемую осевую силу света по ГОСТ 12.2.056–81 [4]. Описанный вариант является более экономным решением, чем первый с диммируемыми блоками питания.

Потребляемая мощность вентилятора Sunon PMD 1238 PQB1-A составляет 3,6 Вт, напряжение питания – 12В постоянного тока (I = 0,3 А). Для питания четырех вентиляторов нужен блок питания со следующими характеристиками: выходная мощность не менее 15 Вт, выходное напряжение – 12 В, выходной ток не менее 1,2 А.

Наиболее подходящим блоком питания является FARADAY 18W/12-24V/78AL. Технические характеристики данного БП приведены в таблице 15.

Рисунок 3.33 – Блок питания FARADAY 18W/12-24V/78AL

Таблица 15 – Технические характеристики блока питания FARADAY 18W/12-24V/78AL [52]

Входное напряжение, В (переменное)	100 – 240
Выходное напряжение, В (постоянное)	12 – 24
Выходная мощность, Вт	18
Выходной ток, А	0,75 – 1,5
Размеры, мм	84x54x25
Рабочая температура, °С	-40..+65

3.4 Расчет на виброустойчивость железнодорожного прожектора

Твердотельная модель прожектора создавалась с помощью программы SolidWorks 2014. Все составляющие элементы прожектора закрепляются винтовыми соединениями, что повышает надежность и жесткость конструкции. На рисунке 3.34 показаны отражатель и твердотельная модель светодиодного прожектора.

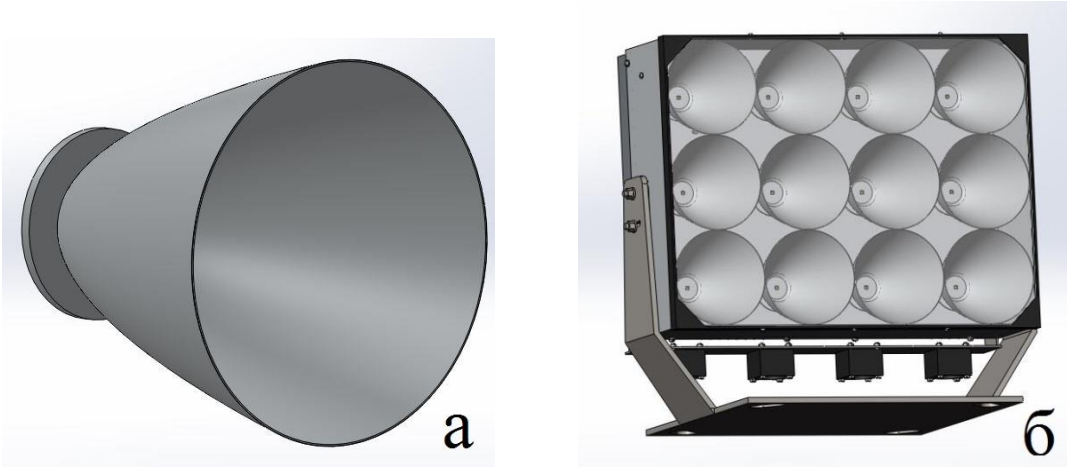


Рисунок 3.34 – а) Отражатель; б) 3D модель прожектора

Отражатели закреплены к радиатору через печатную плату с помощью винтовых соединений. Линейка, несущая вентиляторы, прикреплена жестко к радиатору. Передняя часть корпуса закрыта защищающим стеклом, которое закреплено жестким пластиком. Корпус закреплен к радиатору винтовыми соединениями с четырех сторон.

В работе [3] было установлено, что при проведении частотного анализа характер крепления, геометрический размер, а также количество светодиодов незначительно влияют на частоты собственных колебаний. Крепежные элементы, такие как винты, болты были исключены из модели по причине недостатки необходимой мощности вычислительной машины.

Сначала задается материал для элементов входящих в 3D модель. В качестве материала корпуса рекомендуется сплав алюминия 1060 ГОСТ 4784, материала несуших кронштейнов – литая легированная сталь ГОСТ 4543-71 [53], радиатора АВ9010 – сплав алюминия АД31 ГОСТ 4784-97, печатная плата – печатная плата на металлической основе (MCPCB), материала вентилятора – PBT пластик, отражателя – алюминий. После этого указывается способ закрепления конструкций и внешняя воздействующая нагрузка. Далее создается сетка конечных элементов. Красной стрелкой указано направление внешней нагрузки, в нашем случае это сила тяжести, зелеными стрелками показана область закрепления. Конечно – элементная сетка модели представлена на рисунке 3.35.

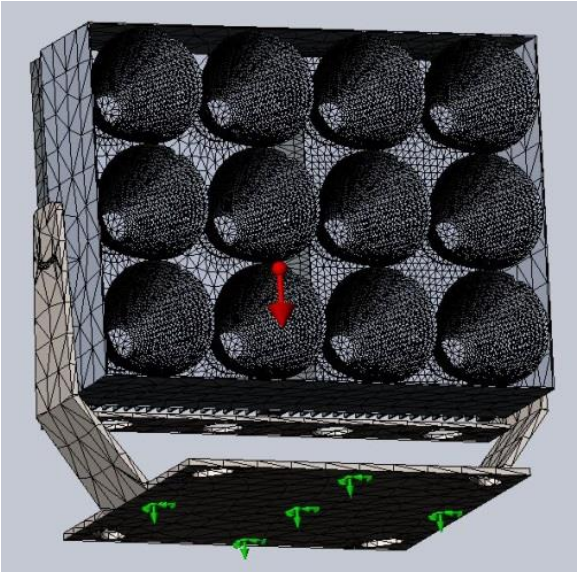


Рисунок 3.35 – Расчетная сетка и ограничения прожектора

В результате компьютерного вычисления получены собственные частоты конструкций и соответствующие им формы колебаний (рисунок 3.36). Собственные частоты прожектора приведены в таблице 16.

Таблица 16 – Собственные частоты конструкций локомотивного прожектора

№	1	2	3	4	5	6
Частоты собственных колебаний, Гц	38,93	75,61	201,53	242,46	353,17	357,35

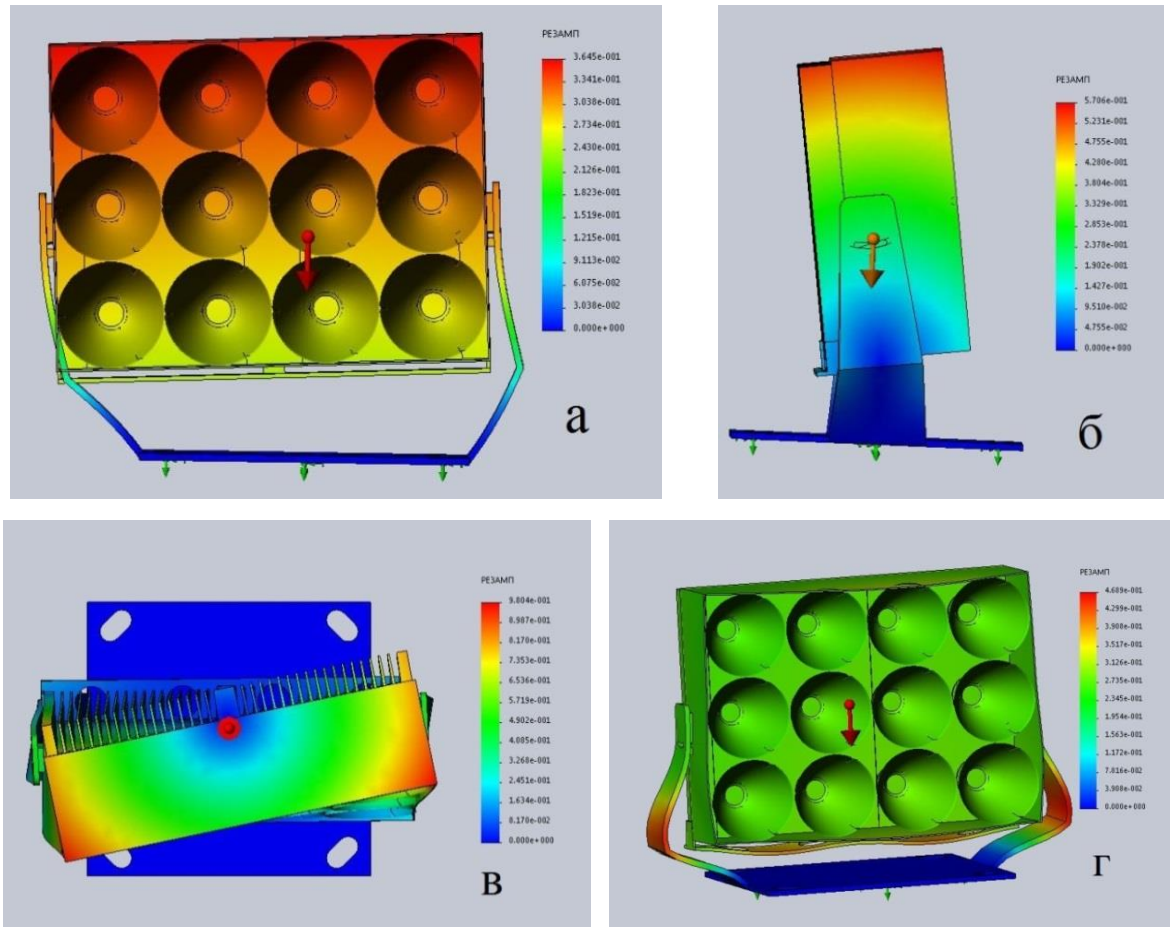


Рисунок 3.36 – Колебания прожектора на различных собственных частотах:
а) 38,93 Гц; б) 75,61 Гц; в) 201,53 Гц; г) 242,46 Гц

Результаты проведенного расчета показали, что часть собственных частот конструкций находится в диапазоне вибраций железнодорожного транспорта (1-150 Гц). На частотах 38,93 Гц, 75,61 Гц, 242,46 Гц и 353,17 Гц максимальной деформации подвергаются несущие кронштейны прожектора. Линейка, несущая вентиляторы, испытывает наибольшую деформацию на собственных частотах 242,46 Гц, 353,17 Гц. На частоте 201,53 Гц имеет место деформирование корпуса

прожектора, при этом отсутствует деформация линейки вентиляторов и несущие кронштейны деформируются незначительно.

На рисунке 3.36а показано колебание прожектора на собственной частоте 38,93 Гц. Колебания прожектора на кронштейнах происходят по горизонтали. На рисунке 3.36б изображен поворот прожектора по оси, перпендикулярной к плоскости основания. Данное колебание соответствует собственной частоте 75,61 Гц. Рисунок 3.36в иллюстрирует кручение корпуса вокруг вертикальной оси прожектора на частоте собственных колебаний 201,53 Гц. Рисунок 3.36г демонстрирует деформацию при изгибе кронштейнов. Данная форма колебаний соответствет частоте 242,46 Гц. В этом случае колебания происходят по вертикали.

После анализа полученных результатов были внесены в конструкцию следующие изменения: несущие кронштейны были модернизированы и для повышения жесткости добавлены косынки с двух сторон, а также к отражателям добавлено центральное кольцо (рисунок 3.37). Центральное кольцо отражателя закреплено к доске с круглыми отверстиями для параболоида. Доска в свою очередь жестко прикреплена к корпусу прожектора. Такое решение позволяет повышать виброустойчивость несущих кронштейнов и отражателя.

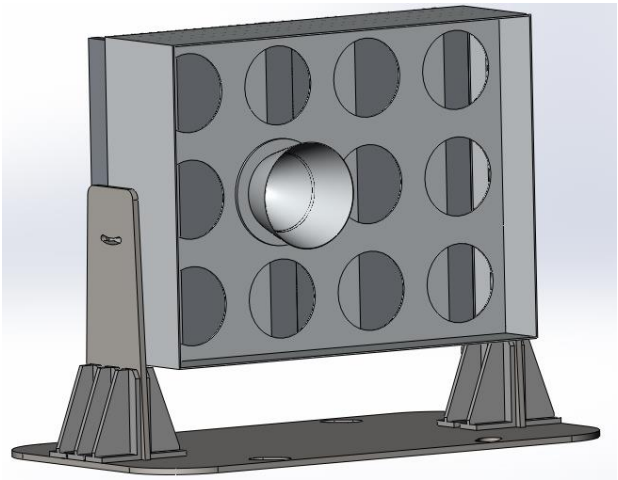
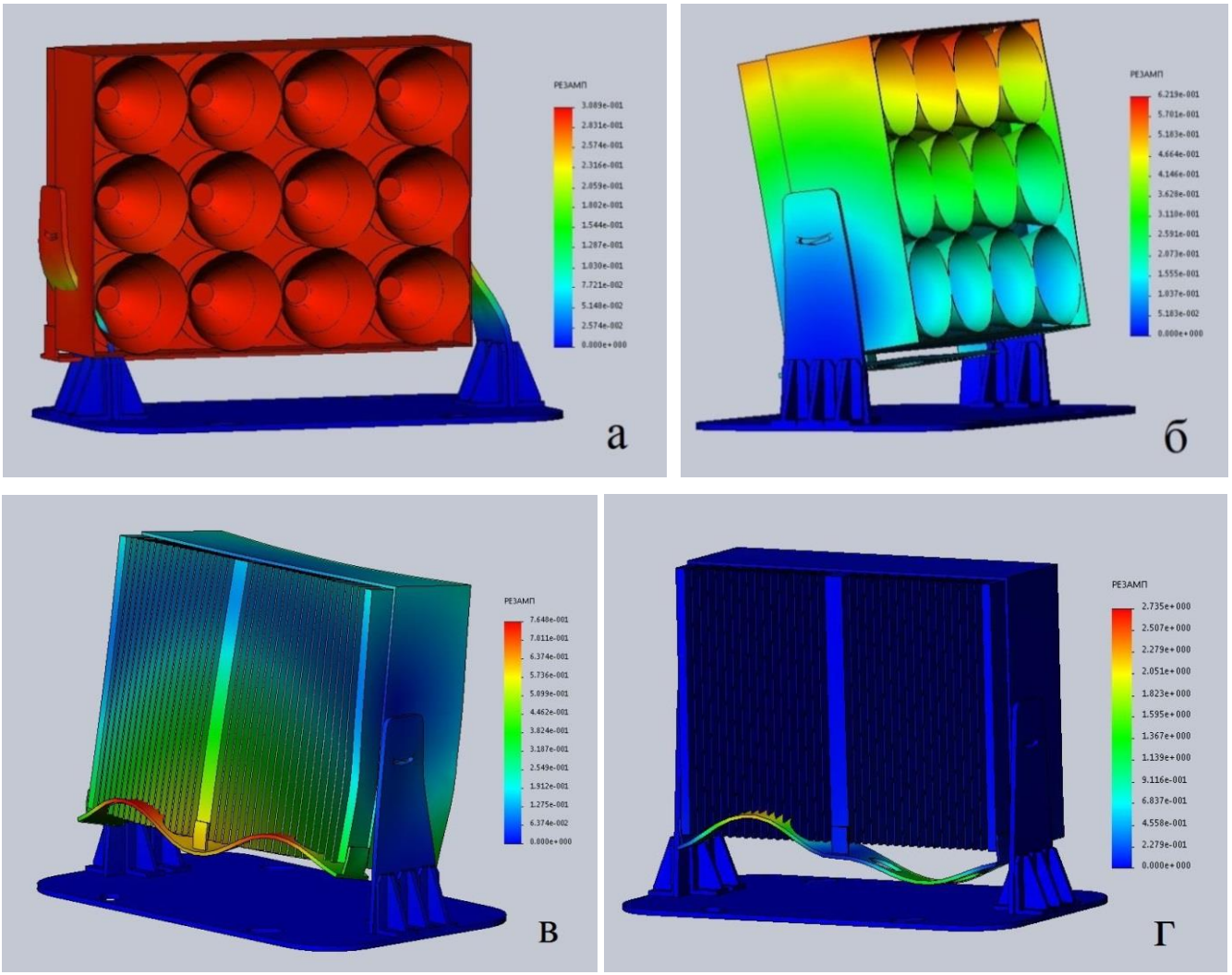


Рисунок 3.37 – Прожектор с модернизированными кронштейнами

Характер деформаций модернизированной конструкций прожектора показан на рисунке 3.38.

Таблица 17 – Собственные частоты модернизированной конструкций локомотивного прожектора

№	1	2	3	4	5	6
Частоты собственных колебаний, Гц	172,03	218,72	461,46	536,08	556,14	577,63



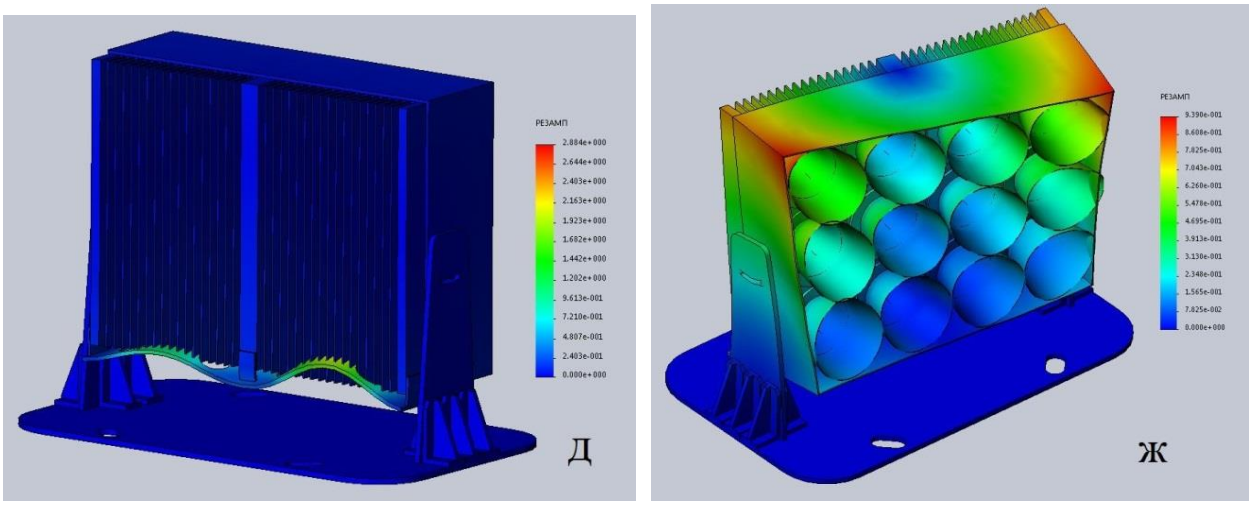


Рисунок 3.38 – Характер колебаний конструкций лобового прожектора на собственных частотах: а) f =172,03 Гц; б) f = 218,72 Гц; в) f = 461,46 Гц; г) f = 536,08 Гц; д) f = 556,14 Гц; ж) f = 577,63 Гц.

Рисунки 3.38 в, г, д демонстрируют колебания линейки для вентиляторов на собственных частотах 461,46; 536,08; 556,14 Гц соответственно. Остальные формы колебаний рассмотрены выше.

Полченные результаты показали, что проведенные мероприятия по повышению жесткости конструкций позволили сдвинуть диапазон собственных частот прожектора в сторону высоких частот, тем самым выведя их за пределы опасного диапазона вибраций, характерных для РЖД (1–150 Гц).

Оптимизация конструкторских решений осуществлялась на основании анализа собственных частот конструкции прожектора, полученных в результате использования вычислительного эксперимента.

На рисунке 3.39 показана визуализация разработанного прожектора.

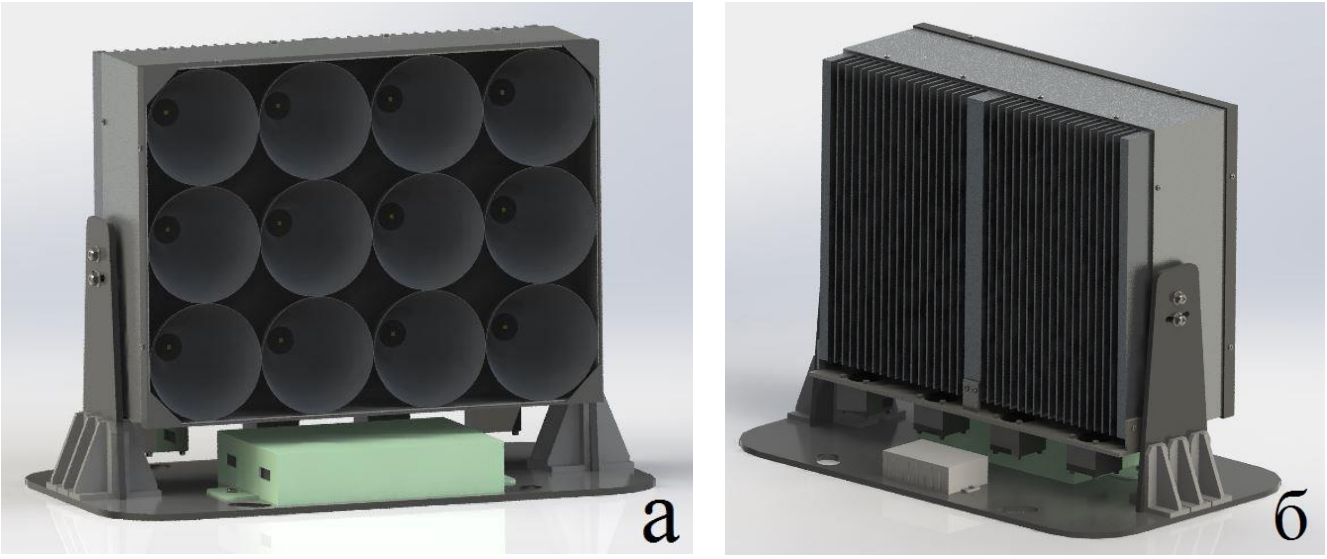


Рисунок 3.39 – Твердотельная модель локомотивного прожектора:

а) вид спереди; б) вид сзади

Таблица 18 – Сравнение локомотивных прожекторов

Характеристики	Предлагаемый прожектор	ЛПБ-01	ЛПС – 55М	Лобовой прожектор с ПЖ-50-500
Общая мощность, Вт	189	350	200	500
Осева сила света Режим «яркий», кд	839 000 – 950 000	800 000 $\pm$ 10%	960 000	
Осева сила света Режим «тусклый», кд	80 000 – 120 00	100 000	80 000	
Угол рассеяния	3^0	$3\text{-}5^0$	–	3^0
Оптика	Отражатель	Линза	Линза	Отражатель
Размер, мм	407x307x147	470 x 150 x 380	Прожектор 460x233 модуль питания 345x370x57	диаметр 370
Вес, кг	20	18	34	-

Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Введение

В данном разделе рассматривается экономический эффект от проектирования модернизированного лобового прожектора со светодиодными источниками света, используемого для освещения пути перед локомотивом в темное время суток.

Объектом исследования является светодиодный прожектор для локомотивов.

Целью данного пред – проектного анализа является расчет финансовых затрат на материалы и комплектующие изделия применяемые при конструировании модернизированного локомотивного прожектора, затрат на заработную плату проектировщика и конструктора и затраты на потребляемую электроэнергию при его эксплуатации. А также для сравнения предлагаемого прожектора с существующими локомотивными прожекторами будут рассчитаны затраты на электроэнергию при эксплуатации прожекторов с лампой накаливания ПЖ-50-500, ЛПБ-01 и ЛПС-55М.

4.1 Первоначальные вложения

4.1.1 Расчет материальных затрат

Финансовые затраты на материалы и комплектующие изделия применяемые при конструировании модернизированного локомотивного прожектора приведены в таблице 19.

Таблица 19 – Расчет стоимости материальных затрат (первый вариант)

Наименование	Марка, размер	Количество, штук	Цена за единицу, руб.	Сумма руб.
Светодиод	XHP –35	12	165,88	1990,56
Вентилятор	Sunon PMD 1238 PQB1-A	4	773	3092,56
Диммируемый блок питания для СД	ARJ-DALI-100	2	4946,41	9892,82
Блок питания для вентиляторов	FARADAY 18W/12-24V/78AL	1	604,50	604,50
Радиатор	AB9010 длиной 300 мм	2	1230	2460
Параболоидный отражатель алюминиевый	под заказ	12	1000	12000
Печатная плата на алюминиевой основе	150x304 мм	2	2343,3	4686,6
Защитное стекло	307x407 мм	1	82	82
Корпус, несущие кронштейны	под заказ	1		5000
Крепежные элементы				1000
Всего				40809,4
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)				1632,4
Итого				42441,8

Финансовые затраты при конструировании экономного варианта модернизированного локомотивного прожектора приведены в таблице 20.

Таблица 20 – Расчет стоимости материальных затрат при конструировании экономного варианта прожектора (второй вариант)

Наименование	Марка, размер	Количество комплектов, штук	Цена одного комплекта, руб.	Сумма руб.
Светодиод	XHP – 35	12	165,88	1990,56
Вентилятор	Sunon PMD 1238 PQB1-A	4	773	3092,56
Блок питания для СД	LAP601050M	2	846	1692
Блок питания для СД	Arlight ARJ-KE401050A	2	573	1146
Блок питания для вентиляторов	HUALUO 15W/12V	1	397	397
Радиатор	AB9010 длиной 300 мм	2	1230	2460
Параболоидный отражатель алюминиевый	под заказ	12	1000	12000
Печатная плата на алюминиевой основе	304x40 мм	4	1162,7	4651,2

Защитное стекло	307х407 мм	1	82	82
Корпус, несущие кронштейны	под заказ	1		5000
Крепежные элементы				1000
Всего				33511,3
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)				1340,5
Итого				34851,7

Таблица 21 – Расчет стоимости материальных затрат при конструировании прожектора без принудительного охлаждения (третий вариант)

Наименование	Марка, размер	Количество комплектов, штук	Цена одного комплекта, руб.	Сумма руб.
Светодиод	XHP – 35	12	165,88	1990,56
Блок питания для СД	LAP601050M	2	846	1692
Блок питания для СД	Arlight ARJ-KE401050A	2	573	1146
Радиатор	AB9029 длиной 300 мм	2	2460	4920
Параболоидный отражатель алюминиевый	под заказ	12	1000	12000
Печатная плата на алюминиевой основе	304х40 мм	4	1162,7	4651,2
Защитное стекло	307х407 мм	1	82	82
Корпус, несущие кронштейны	под заказ	1	-	5000
Крепежные элементы				1000
Всего				32481,7
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)				1299,3
Итого				33780,9

4.1.2 Расчет заработной платы проектировщика и конструктора

Расчет ЗП проектировщика и конструктора производится в соответствии с трудоемкостью разработки светотехнических работ.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{дн} = \frac{З_м \cdot М}{F_д} \quad (13)$$

где $З_м$ – месячный оклад;

М – количество месяцев работы в год;

$F_д$ – количество рабочих дней в год.

При 5 дневной рабочей неделе количество месяцев работы равно 11,2. При расчете учитывалось, что в месяце 22 рабочего дня и, следовательно, в году 246,4 рабочих дней. Месячные оклады проектировщика и конструктора приведены в таблице 22.

Дневной оклад проектировщика составляет 636,4 руб, конструктора – 772,7 руб. Затраты времени $T_{раб}$ на выполнение работы по каждому исполнителю приведены в таблице 22. Районный коэффициент $К_р$ составляет 1,3 (для Томска), премиальный коэффициент $К_{пр} = 1{,}4$.

Основная заработная плата рассчитается по формуле:

$$З_{осн} = З_{дн} \cdot T_{раб} \cdot (К_{пр} + К_р) \quad (14)$$

Основная заработная плата $З_{осн}$ проектировщика равна 32456,4 руб, конструктора – 3940,77 руб. Тогда основная заработная плата рабочего персонала составляет 36397,2 руб.

Таблица 22 – Затраты на основную заработную плату

	Месячный оклад $З_м$, руб	Среднедневная ставка, $З_{дн}$, руб/день	Затраты времени, $T_{раб}$, раб.день	Коэффициент $К_{пр} + К_р$	Основная з/пл, $З_{осн}$,руб.
проектировщик	14000	636,4	30	1,7	32456,4
конструктор	17000	772,7	3	1,7	3940,77
Итого					36397,2

Дополнительная заработная плата определяется как 10 % от основной зарплаты

$$З_{доп} = \frac{З_{осн} \times 10}{100} \quad (15)$$

Дополнительная заработная плата проектировщика равна 3245,6 руб, конструктора –394 руб.

Тогда, общая затрата на заработную плату проектировщика и конструктора составляет:

$$З_{общ} = З_{осн} + З_{доп} \quad (16)$$

$$З_{общ} = (32456{,}4 + 3940{,}77) + (3245{,}6 + 394) = 40036{,}8 \text{ руб}$$

4.1.3 Отчисления на социальные нужды

Отчисления во внебюджетные фонды определяются по формуле:

$$С_{внеб} = k_{внеб} \times (З_{осн} + З_{доп}) \quad (17)$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент, учитывающий размер отчислений из заработной платы (пенсионный фонд Российской Федерации – 22%, фонд социального страхования Российской Федерации – 2,9%, фонд обязательного медицинского страхования 5,1%). Он равен 0,3.

Для проектировщика

$$С_{внеб} = 0{,}3 \times (32456{,}4 + 3245{,}6) = 10710{,}6 \text{ руб}$$

Для конструктора

$$С_{внеб} = 0{,}3 \times (3940{,}77 + 394) = 1300{,}4 \text{ руб}$$

4.1.4 Накладные расходы

Здесь рассматриваются затраты, связанные с обслуживанием и организацией процесса проектирования и производства.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$С_{накл} = k_{накл} \cdot (З_{осн} + З_{доп}) \quad (18)$$

где $k_{накл}$ – коэффициент накладных расходов, равный 0,7.

$$С_{накл} = 0{,}7 \cdot 40036{,}8 = 28025{,}7 \text{ руб}$$

Таблица 23 – Калькуляция затрат на проектирование и конструирование прожектора

Статья затрат	Единицы измерения	Сумма затрат, руб.
Затраты на материалы и комплектующие изделия	руб	42441,8

Продолжение таблицы 23

Общая затрата на заработную плату рабочего персонала	руб	40036,8
Отчисления на социальные нужды	руб	12011
Накладные расходы	руб	28025,7
Итого плановая себестоимость	руб	122515,4

На рисунке 4.1 приведена диаграмма затрат на проектирование и конструирование прожектора.

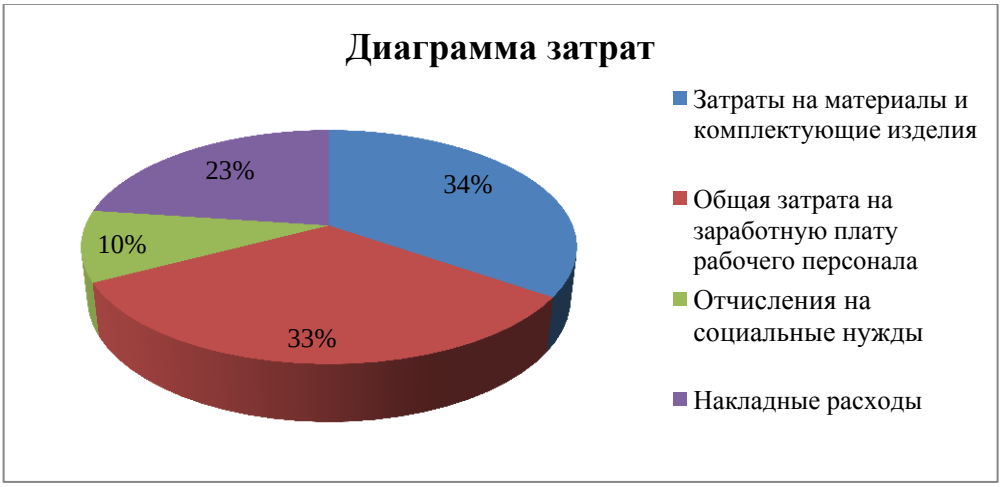


Рисунок 4.1 – Диаграмма затрат на проектирование и конструирование прожектора

4.2 Эксплуатационные затраты

Таблица 24 – Сравнение модернизированного и существующих локомотивных прожекторов

	Лобовой фонарь ПЖ 50-500	ЛПБ – 01	ЛПС –55М	Модернизированный прожектор
Источник света	Лампа накаливания ПЖ 50-500	Светодиоды	Светодиоды	Светодиоды
Мощность, Вт	500	350	200	189

Потребляемая мощность световой части модернизированного прожектора рассчитается по формуле:

$$P_1 = \alpha \cdot \Sigma W_{ИС} \quad (19)$$

где $\Sigma W_{ИС}$ – суммарная установленная мощность осветительного прибора, кВт;

α – коэффициент, учитывающий потери электроэнергии в пускорегулирующем аппарате источников света.

КПД выбранного блока питания светодиодов ARJ-DALI-100 составляет не менее 0,9. Тогда коэффициент ПРА в этом случае равен 1,11. Суммарная установленная мощность светового прибора:

$$\Sigma W_{ИС} = n \cdot P_{СД} \quad (20)$$

где $P_{СД}$ – мощность светодиода XHP–35, которая равна 13Вт;

n – количество используемых светодиодов, равное 12.

Поставив на место все указанные значения определяем суммарную установленную мощность и мощность потребления световой части прожектора:

$$\Sigma W_{ИС} = 12 \cdot 13 = 156 \text{ Вт} = 0{,}156 \text{ кВт}$$

$$P_1 = 1{,}11 \cdot 156\text{Вт} = 173{,}16 \text{ Вт} = 0{,}173 \text{ кВт}$$

Мощность потребления системы активного охлаждения определяется по той же формуле (20). КПД выбранного блока питания для вентиляторов FARADAY 18W/12-24V/78AL равен 0,92. Коэффициент учитывающий потери электроэнергии составляет 1,087. Активная система охлаждения прожектора состоит из четырех вентиляторов, каждый мощностью 3,6 Вт.

$$\Sigma W_{ИС} = n \cdot P_{СД} = 4 \cdot 3{,}6 = 14{,}4 \text{ Вт}$$

$$P_2 = 1{,}087 \cdot 14{,}4 \text{ Вт} = 15{,}65 \text{ Вт} \approx 0{,}0156 \text{ кВт}$$

Тогда общая потребляемая мощность модернизированного прожектора равна:

$$P_\Sigma = P_1 + P_2 = 173{,}16 + 15{,}65 = 188{,}81 \text{ Вт} \approx 0{,}189 \text{ кВт}$$

Потребляемая электроэнергия за год при эксплуатации модернизированного прожектора в кВт · ч:

$$P_{год} = P_\Sigma \cdot T \quad (21)$$

где T – средняя продолжительность работы светового прибора в год (12 часов в сутки). Она в среднем равна 4380 часов.

$$P_{\text{год.модерн}} = 0{,}189 \cdot 4380 = 827{,}82 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Потребляемая электроэнергия за год при эксплуатации прожекторов с лампой накаливания (ЛН) ПЖ 50 – 500, ЛПБ – 01 и ЛПС – 55М в кВт · ч:

$$P_{\text{год.ЛН}} = 0{,}5 \cdot 4380 = 2190 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

$$P_{\text{год.ЛПБ}-01} = 0{,}35 \cdot 4380 = 1533 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

$$P_{\text{год.ЛПС}-55\text{М}} = 0{,}2 \cdot 4380 = 876 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Потребляемые мощности данных прожекторов приведены в таблице 24.

Стоимость электроэнергии, израсходованной за год, может быть определена по следующей формуле:

$$\text{С}_{\text{год}} = P_{\text{год}} \times q, \text{руб} \tag{22}$$

где q – стоимость электроэнергии 1 кВт · ч, равная 4,63 руб.

$$\text{С}_{\text{год.модерн}} = 827{,}82 \times 4{,}63 = 3832{,}80 \text{ руб}$$

$$\text{С}_{\text{год.ЛН}} = 2190 \times 4{,}63 = 10139{,}7 \text{ руб}$$

$$\text{С}_{\text{год.ЛПБ}-01} = 1533 \times 4{,}63 = 7097{,}79 \text{ руб}$$

$$\text{С}_{\text{год.ЛПС}-55\text{М}} = 876 \times 4{,}63 = 4055{,}88 \text{ руб}$$

Средняя стоимость суммарных затрат на электроэнергию за месяц, руб:

$$\text{С}_{\text{мес}} = \frac{\text{С}_{\text{год}}}{12}; \text{руб} \tag{23}$$

$$\text{С}_{\text{мес.модерн}} = \frac{3832{,}80}{12} = 319{,}4 \text{ руб}$$

$$\text{С}_{\text{мес.ЛН}} = \frac{10139{,}7}{12} = 844{,}97 \text{ руб}$$

$$\text{С}_{\text{мес.ЛПБ}-01} = \frac{7097{,}79}{12} = 591{,}48 \text{ руб}$$

$$\text{С}_{\text{мес.ЛПС}-55\text{М}} = \frac{4055{,}88}{12} = 337{,}99 \text{ руб}$$

Глава 5. Социальная ответственность

Введение

В условиях научно-технического развития, внедрения новейших техники и технологий, быстро растущего производства, роста роли человека на производстве и социальной значимости безопасных и здоровых условий труда актуальность проблем безопасности жизнедеятельности сильно возрастает.

В данном разделе будут рассматриваться характеристики производственных и экологических опасностей, разработка систем обеспечения производственной и экологической безопасности, организационно-экономическое обеспечение системы безопасности жизнедеятельности при эксплуатации светодиодного прожектора для локомотивов.

Разработанный светодиодный прожектор используется для освещения пути перед локомотивом в темное время суток. Данный световой прибор устанавливается в кабине локомотива.

Целью раздела является идентификация возможных вредных и опасных факторов в кабине машиниста при эксплуатации светодиодного прожектора и решение вопросов обеспечения защиты от них на основе требований действующих нормативно-технических документов.

5.1 Производственная безопасность

Вредным фактором считается фактор, воздействие которого может привести к заболеванию, нарушению здоровья потомства, а также может вызывать временное или стойкое ухудшение самочувствия. Опасным фактором называется такой фактор, который может привести к травме или гибели человека при однократном кратковременном воздействии.

Таблица 25 – Вредные и опасные факторы при эксплуатации светодиодного прожектора для локомотивов

Источник фактора, наименование видов работ	Факторы (ГОСТ 12.0.003-74)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Система осветительного устройства с принудительным охлаждением на основе вентиляторов.	Повышенный уровень шума	Электрический ток	ГОСТ 12.1.003-83 [54] ГОСТ Р МЭК 61140-2000 [55]
	Показатель ослепленности		ОСТ 32.120-98 [56] ГОСТ 12.2.056–81 [4]
	Пульсация освещенности		СНиП 23-05-95* [57]

5.1.1 Анализ выявленных вредных факторов

Повышенный уровень шума

Источником звуков являются вибрирующие тела, вызывающие колебания частиц воздуха. Шум оказывает на организм человека неблагоприятное воздействие, приводит к техническим и физиологическим нарушениям, снижает работоспособность и может вызвать различного рода болезненные состояния, в том числе тугоухость и глухоту.

Допустимые уровни звукового давления, эквивалентного уровня звука в кабинах машинистов тепловозов, электровозов, поездов метрополитена, дизель-поездов и автомотрис приведены в таблице 26 (ГОСТ 12.1.003-83) [54].

Таблица 26 – Допустимые значения уровней звукового давления в октавных полосах частот и уровня звука

Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентные уровни звука в дБ
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
99	95	87	82	78	75	73	71	69	80

Допустимые уровни звукового давления, эквивалентного уровня звука в кабинах машинистов скоростных и пригородных электропоездов приведены в таблице 27 (ГОСТ 12.1.003-83) [54].

Таблица 27 – Допустимые значения уровней звукового давления в октавных полосах частот и уровня звука

Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентные уровни звука в дБ
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
99	91	83	77	73	70	68	66	64	75

В данном случае источником шума является вентилятор охлаждения прожектора. Для охлаждения светового прибора используются четыре вентилятора Sunon PMD 1238 PQB1-A. Шум генерирующийся при работе вентиляторов может неблагоприятно воздействовать на здоровье машиниста. Уровень шума создаваемого вентилятором PMD 1238 PQB1-A составляет 47 дБ [47] и соответствует требуемым нормам.

Показатель ослепленности

Показатель ослепленности характеризует прямое слепящее действие осветительного устройства. По показателю ослепленности можно судить о степени ухудшения видимости при действии блестящих источников света. Максимальное допустимое значение показателя ослепленности осветительной установки на железнодорожных станциях составляет 800 по ОСТ 32.120-98 [56]. Если показатель ослепленности осветительного устройства превышает пороговое значение, то принимаются необходимые меры по снижению значения данного показателя.

Разработанный лобовой прожектор формирует мощный световой поток с углом рассеяния 3^0. Прямой и отраженный от стенки параболоида интенсивный

свет может вызвать ослепление машинистов встречных поездов, а также пассажиров во время стоянки возле вокзала.

Чтобы избежать таких последствий предлагаемый прожектор обеспечивает два режима работы источников света: яркий свет $(6{,}4–9{,}6)\cdot 10^5$ кд и тусклый свет $(0{,}7–1{,}2)\cdot 10^5$ кд по ГОСТ 12.2.056–81 [4]. Переключение в режим «тусклый свет» осуществляется посредством блока питания ARJ-DALI-100, который позволяет плавно регулировать осевую силу света прожектора, что уменьшает вероятность ослепления людей находящихся вокруг локомотива [49].

Пульсация освещенности

Коэффициент пульсаций освещенности является очень важным показателем. Существенные пульсации общей освещенности могут негативно воздействовать на здоровье машиниста. Пульсации искусственного света оказывают существенное негативное влияние на здоровье человека - в первую очередь на органы зрения и центральную нервную систему. Мерцающий свет перегружает зрительную и нервную систему человека, нарушает естественные биоритмы. Типичные симптомы воздействия пульсирующего светового потока - повышенная утомляемость, сухость и боль в глазах, головные боли, раздражительность. При длительном воздействии пульсации света могут приводить к хроническим заболеваниям.

Нормируется этот показатель в СНиП 23-05-95* [57]. Коэффициент пульсаций общего освещения не должен превышать 10%. Уровень пульсаций освещенности, создаваемой световым прибором со светодиодными источниками света, зависит от качества используемого блока питания. В предлагаемом прожекторе низкий уровень пульсаций освещенности обеспечивается использованием блока питания прожектора ARJ-DALI-100, который преобразует

переменное напряжение электрической сети в постоянный стабилизированный ток [49].

5.1.2 Анализ выявленных опасных факторов

Электрический ток

Светильники классифицируются по классам защиты от поражения электрическим током в соответствии с международным стандартом МЭК 61140 [55]. Исследуемый прожектор относится к классу защиты II. К данному классу относятся светильники, у которых используется двойная изоляция. Светильники с данным классом защиты маркируются специальным графическим знаком.

Рисунок 5.1 – Графический знак класса защиты II

Блок питания располагается в отдельном металлическом корпусе и имеет входное напряжение от 110 до 240 вольт. Используемый блок питания ARJ-DALI-100 имеет защиту от короткого замыкания и перегрузки по току. Электробезопасность прибора достигается за счёт проводов, которые защищены двойной изоляцией, а в местах соединений закрыты термоусадочными трубками и соединительными изолирующими зажимами. Благодаря такой встроенной защите практически полностью исключается риск короткого замыкания.

Кабина управления электровоза, тепловоза в отношении опасности поражения людей электрическим током относится к помещениям с повышенной опасностью, так как характеризуется наличием токопроводящих металлических полов, согласно ПУЭ [58]. Относительная влажность в кабине машиниста

локомотива не превышает 70%, а температура воздуха на высоте 1500 мм от пола не более 28 ℃ по СП 2.5.1336-03 (Приложение №1) [59]. В кабине локомотива отсутствует токопроводящая пыль.

При приемке электровоза, тепловоза локомотивная бригада должна проверить наличие и пригодность средств индивидуальной защиты от поражения электрическим током:

- диэлектрических перчаток;
- диэлектрических бот;
- диэлектрических ковров;
- штанг для снятия емкостных зарядов с силовых цепей и заземления первичной обмотки тягового трансформатора (для электровозов переменного тока);
- штанг изолирующих.

На средствах защиты от поражения электрическим током, кроме диэлектрических ковров и инструмента с изолированными рукоятками, должна быть проверена дата их следующего испытания, а также соответствие их напряжению электрооборудования локомотива. Запрещается пользоваться средствами защиты с истекшим сроком испытания. Диэлектрические перчатки и коврики не должны иметь механических повреждений. Влажные перчатки следует протереть сухой тканью снаружи и изнутри [60].

5.2 Экологическая безопасность

Источниками света проектируемого локомотивного прожектора являются свтеодиоды. Светодиодные источники света не содержат токсичных вешеств, таких как ртуть и их применение является экологически безопасным решением для современного освещения. Благодаря этому для обслуживания и утитилизации прожектора не требуется создания специальных условий. Материалы, из которых

изготовлены все комплектующие элементы прожектора, при нагревании не выделяют вредных веществ и газов. Светодиодный прожектор не имеет ни инфракрасного, ни ультрафиолетового излучения.

Непосредственная утилизация светодиодного прожектора происходит по стандартной схеме утилизации твердых бытовых отходов. Корпус, отражатели, изготовленные из алюминия, несущие кронштейны из стали, а также пластик вентиляторов отправятся на переработку вторсырья. Отсутствие ртути позволит обойтись без затратного метода демеркуризации использованного изделия и особых условий по сбору и транспортировки отходов. При работе с отходами светодиодных прожекторов отсутствует потребность использования дополнительных средств защиты.

Утилизация блока питания по завершении его срока службы должна выполняться в соответствии с требованиями всех государственных нормативов и законов. Блоков питания вышедших из строя нельзя вбрасывать совместно с бытовыми отходами. Их следует передать в специализированные структуры, которые занимаются утилизацией электронных отходов по Федеральному закону № 89 от 1998г. «Об отходах производства и потребления» [61]. Отработавший свой ресурс блок питания подлежит складированию и утилизации в соответствии с принятым в организации порядком утилизации.

5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Пожарная безопасность

К вероятным чрезвычайным ситуациям, которые могут возникнуть при эксплуатации прожектора, относится пожар. Причиной возникновения пожара при работе прожектора может стать короткое замыкание, превышение допустимого напряжения, перегрузка блока питания.

Короткое замыкание может возникать в результате попадания воды и скопления влаги в электросхемах. Данный световой прибор обладает степенью защиты IP 55, то есть прожектор имеет защиту от струй, падающих под любым углом по ГОСТ 14254-96 [62]. Мощность используемого блока питания составляет 100 Вт [49]. Чтобы не перегрузить блок питания к нему подключается группа светодиодов с общей мощностью 78 Вт.

Есть основные нормативные документы, в которых предъявляются противопожарные требования к конкретному производимому оборудованию. Для светотехнического оборудования таким нормативным документом является НПБ 249-97 [63].

Корпус прожектора может быть изготовлен из алюминия или теплорассеивающих пластмасс. Основным материалом для корпуса мной был выбран алюминий, на основе двух основных преимуществ:

- хорошего теплоотвода за счет низкого теплового сопротивления материала, что обеспечивает продолжительный срок службы светодиодов;
- негорючести этого металла и отсутствии выделения вредных газов и веществ при нагревании.

Несущие кронштейны и линейка, несущая вентиляторов, выполнены из легированной стали. Материал применяемого вентилятора – ПВТ пластик, а также фиксирующий элемент защитного стекла сделан из жесткого пластика ПВХ. Блок питания располагается в отдельном металлическом корпусе и находится в удалении не менее 30 мм от ближайшего края ПВХ пластика и вентиляторов. Данная предосторожность уменьшает возможность температурного воздействия на пластика при неисправности блока питания. Эти меры дополнительно снижают опасность возгорания полимерных материалов в соответствии с требованием НПБ 249-97 [63].

Под системой пожарной защиты понимается комплекс организационных мероприятий и технических средств, направленных на предотвращение

воздействия на людей опасных факторов пожара, а также ограничение материального ущерба.

Для устранения возможных причин пожаров при эксплуатации осветительного устройства проводится ряд следующих мероприятий:

- Своевременное проведение профилактических осмотров и планово-предупредительных ремонтов светового прибора;
- Своевременное устранение нарушений правил техники эксплуатации прожектора, могущих привести к пожарам и загораниям;
- Обеспечение правильного теплового и электрического режима работы светодиодного прожектора;
- Обеспечивать исправность средств для ликвидации пожаров в осветительных устройствах и кабельных сооружениях;
- Систематически контролировать состояние изоляций проводов прожектора.

В кабине локомотива имеются первичные средства пожаротушения, приведенные в таблице 28 [64].

Таблица 28 – Нормы оснащения подвижного состава первичными средствами пожаротушения

Название объекта защиты	Огнетушители						Аэрозольные генераторы типа АГОС-5
	Водные и воздушно-пенные	Воздушно-эмульсионные	Порошковые		Углекислотные		
	5,10 л	5 л	2 л	5(10) л	3 л	5 (8) л	
Электровозы	1	1		1		2	2
Тепловозы	1	1		1		1	

5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Прожектор должен быть установлен по продольной оси симметрии локомотива. Осевой луч прожектора должен быть направлен параллельно

горизонтальной плоскости пути по ГОСТ 12.2.056–81 [4]. Для обеспечения данного требования представлена возможность регулировки наклона прожектора. Для регулировки угла наклона прожектора по вертикали необходимо ослабить боковые винты осевого крепления кронштейна на корпусе, затем установить необходимый угол наклона и зафиксировать положение, затянув винты. А также монтажная поверхность должна быть ровной.

Крепление светодиодного прожектора на поверхности осуществляется с помощью кронштейна с четырьмя отверстиями. Для надежной фиксации прожектора необходимо на опоре прочно закрепить кронштейн, затянув с усилием крепежные винты и болты.

Правила установки и эксплуатации светодиодного прожектора:

- Монтаж, демонтаж и обслуживание светодиодного прожектора осуществляется при выключенном питании сети;
- Во время установки и подключения прожектора руки должны быть сухими;
- При установке прожектора между корпусом прожектора и окружающими предметами должно остаться необходимое пространство, которое не препятствует естественной конвекции.

При загрязнении защитного стекла прожектора необходимо очистить поверхность без использования растворителей, агрессивных моющих и абразивных средств. Очистка производится водой или специальным моющим средством для стекла и пластика. Во избежание нарушения тепловых режимов эксплуатации прожектора необходимо следить за чистотой поверхностей корпуса и ребер радиатора. Очистка производится сухой или слегка влажной тканью.

Заключение

В данной работе был разработан светодиодный лобовой прожектор для локомотивов. Источником света являются светодиоды XHP-35 компаний Cree, снабженные индивидуальными параболоидными отражателями. Параболоидный отражатель в свою очередь обеспечивает необходимые характеристики прожектора и является достаточно технологичным.

Проведено исследование разработанного прожектора. Рассмотрено несколько вариантов системы охлаждения прожектора на основе пассивного и активного охлаждения. Определено оптимальное решение, которым является использование радиатора AB 9010 с четырьмя вентиляторами Sunon PMD 1238 PQB1-A.

Осевая сила света прожектора с учетом всех возможных потерь находится в диапазоне 806 840 – 950 000 кд (яркий свет), что соответствует требованиям безопасности регламентируемым ГОСТ 12.2.056-81. Угол рассеяния на уровне половины силы света равен 3°. Габаритные размеры прожектора: 407 x 307x147 мм. Общая потребляемая мощность прожектора равна 189 Вт. КПД прожектора составляет 70%.

Выполнен анализ собственных колебаний прожектора. На основе этого анализа проведена оптимизация конструкций прожектора.

Преимуществом предлагаемого локомотивного прожектора являются низкая потребляемая мощность, достаточный теплоотвод, жесткая конструкция с повышенной стойкостью к вибрациям, характерным для РЖД.

В разделе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» были рассчитаны финансовые расходы на материалы и комплектующие изделия, применяемые при конструировании локомотивного прожектора.

В разделе «Социальная ответственность» были рассмотрены производственная, экологическая безопасность и безопасность в чрезвычайных ситуациях при эксплуатации светодиодного прожектора.

Список публикаций

1. Рымхан А.М. Светодиодный прожектор для локомотивов / А.М. Рымхан, Б.П. Гриценко, С.Ю. Гурин // Высокие технологии в современной науке и технике. – Томск. – 2016. – С. 241-242.

2. Рымхан А.М. Светодиодный прожектор для локомотивов / А.М. Рымхан, Б.П. Гриценко, С.Ю. Гурин // Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики. – Саранск . – 2017. – С. 88-92.

Список литературы

1. Туркин А. Светодиодные новинки Cree и перспективы их применения // Полупроводниковая светотехника. – 2016. – №6. – С.36-38.
2. Кашкаров А. Мощные светодиоды в осветительных устройствах // Современная электроника. –2014. – № 6. – С.68-73.
3. Абульханов С.Р. Оптимизация конструкции железнодорожного прожектора в программной среде ANSYS / С.Р. Абульханов, Д.Л. Скуратов // Известия Самарского научного центра РАН. – 2014. Т.16. – №1 (2). – С. 335-339.
4. ГОСТ 12.2.056–81. Система стандартов безопасности труда. Электровозы и тепловозы колеи 1520 мм. Требования безопасности. – Москва: Издательство стандартов, 2002. – 27с.
5. LED traffic signaler for railway use: патент № DE 10216393 A1; заявл. 12.04.2002; опубл. 30.10.2003.
6. Многоцветный комбинированный прожектор-фара: патент Рос.Федерация № 2274801; заявл. 05.12.2003; опубл. 20.04.2006, Бюл. №11.
7. Модульный светодиодный прожектор: патент на полезную модель Рос.Федерация № 99104; заявл. 18.06.2010 ; опубл. 10.11.2010.
8. Кузнецов В. Современные разработки локомотивного освещения на светодиодах и перспективы отечественного светодиодного производства [Текст] / В. Кузнецов // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – №4.–С.56-58.
9. Светодиодный лобовой прожектор ЛПС-55М [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://dnoemz.ru/products/7/134/. (дата просмотра) 18.05.2017.
10. Светодиодный прожектор: патент Рос.Федерация № 99592; заявл. 18.06.2010 ; опубл. 20.11.2010.
11. Модульный светодиодный прожектор: патент Рос.Федерация № 2510644; заявл. 09.08.2012; опубл. 10.04.2014, Бюл. № 10.

12. Лотар Н. Охлаждение и регулирование температурных режимов светодиодов / Н. Лотар // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – № 3. – С. 13-15.

13. Understanding LED lifetime analysis [Электронный ресурс]. – Режим доступа:http://www.climateactionprogramme.org/images/uploads/documents/Philips_Understanding-Power-LED-Lifetime-Analysis.pdf (дата просмотра) 18.05.2017.

14. Документация светодиода серии MK-R компании CREE [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.cree.com/~/media/Files/Cree/LED-Components-and-Modules/XLamp/Data-and-Binning/XLampMKR.pdf. (дата просмотра) 18.05.2017.

15. Документация светодиода LEW E3A компании OSRAM [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.farnell.com/datasheets/52344.pdf (дата просмотра) 18.05.2017.

16. Thermal Management of Cree LEDs [Электронный ресурс]. Режим доступа:http://www.cree.com/~/media/Files/Cree/LED%20Components%20and%20Modules/XLamp/XLamp%20Application%20Notes/XLampThermalManagement.pdf. (дата просмотра) 18.05.2017.

17. Андреас П. Особенности расчета систем отвода тепла при использовании светодиодов в корпусах PLCC / П. Андреас // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – №5. – С. 54-57.

18. Ежов. В. Стандартизация и расчет тепловых характеристик мощных светодиодов / В. Ежов // Светотехника и оптоэлектроника. – 2009. – №6. – С. 42-48.

19. Винокуров А. Расчет печатных плат для светодиодов Cree серий XP и MX / А. Винокуров // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – №3. – С. 16-20.

20. Optimizing PCB thermal performance [Электронный ресурс]. – Режим доступа:http://www.cree.com/~/media/Files/Cree/LED%20Components%20and%20M

odules/XLamp/XLamp%20Application%20Notes/XLamp_PCB_Thermal.pdf. (дата просмотра) 18.05.2017.

21. Староверов К. Системы охлаждения для светодиодов / К. Староверов // Новости электроники. – 2008. – №17. – С. 21-23.

22. Криваткин А. Теплорассеивающие пластмассы вызов алюминию / А. Криваткин, Ю. Сакуненко // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – №1. – С. 54-56.

23. Шевырева А. Sunon представляет решение для охлаждения мощных светодиодов / А. Шевырева // Компоненты и технологии. – 2009. – № 8. – С. 100-102.

24. Светодиодная лампа на парафиновом охлаждении [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://prostonauka.com/svetodiodnaja-lampa-na-parafinovom-ohlazhdenii. (дата просмотра) 18.05.2017.

25. Луценко Е. Температура перегрева активной области коммерческих светодиодов и светодиодов с прямым жидкостным охлаждением чипа / Е. Луценко // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – № 2. – С. 26-29.

26. Аракелов Г. А. О некоторых особенностях оптимизации режимов электропитания термоэлектрических охладителей в составе фотоприемников / Г. А. Аракелов, Л. Б. Ершова, Г. Г. Громов // Прикладная физика. – 2007. – № 3. – С. 73-77.

27. Raslear T. Alerting lights on locomotives / T. Raslear // Research Results RR07-17. – 2007. – С.1–4.

28. Казанский Н.Л. Распределённая система технического зрения регистрации железнодорожных составов / Н.Л. Казанский, С.Б. Попов // Компьютерная оптика. Том 36. – 2012. – № 3. – С. 419-428.

29. Попов С.Б. Использование структурированной подсветки в системах технического зрения / С.Б. Попов // Компьютерная оптика. Том 37. – 2013. – № 2. – С. 233-238.

30. Марков В.А. О вопросах демпфирующих и амортизирующих свойств материалов и конструкций / В.А. Марков, В.И. Пусев, В.В. Селиванов // Наука и образование (электронное издание). – 2012. – №6. – С. 1-14.

31. ГОСТ Р МЭК 60598-1-2011. Светильники. Часть 1. Общие требования и методы испытаний. – Москва: Стандартинформ, 2012. – 143 с.

32. Locomotive LED/Optics Headlight Assembly: патент US № 20130051045 A1; заявл. 28.08.2012; опубл. 28.02.2013.

33. LED spotlight including elliptical and parabolic reflectors: патент US № 8403530 B2; заявл. 21.09.2010; опубл. 26.03.2013.

34. Технический регламент ТС «О безопасности железнодорожного подвижного состава» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://webportalsrv.gost.ru/portal/GostNews.nsf/acaf7051ec840948c22571290059c78f/31df4d876b7c282244257a37003e01d3/$FILE/TR_TS_001-2011_text.pdf. (дата просмотра) 18.05.2017.

35. Абульханов С.Р. Виброустойчивость конструкции лобового фонаря электровоза серии ВЛ / С.Р. Абульханов, Е. В. Лопатин // Вестник Транспорта Поволжья. – 2013. – № 6 (42). – С. 30–36.

36. Абульханов С.Р. Построение аутентичной 3D модели лобового фонаря электровоза серии ВЛ / С.Р. Абульханов // Вестник Самарского государственного университета путей сообщения. – 2012. Вып. 3(17). – С. 81-86.

37. LightTools Features [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://optics.synopsys.com/lighttools/lighttools-feature-details.html(дата просмотра) 18.05.2017.

38. Алямовский А.А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации. – М.: ДМК Пресс, 2015. –562 с.

39. Гончаров М., Дворников В. Моделирование тепловых режимов работы аппаратуры силовой электроники в среде SolidWorks Flow Simulation // Силовая электроника. – 2010. – №2. – С. 98–100.

40. Документация светодиода XHP-35 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.cree.com/~/media/Files/Cree/LED-Components-and-Modules/XLamp/Data-and-Binning/ds--XHP35.pdf. (дата просмотра) 19.05.2017.

41. Зависимость коэффициента отражения алюминия от длины волны [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.elektrosteklo.ru/Al_rus.htm (дата просмотра) 19.05.2017.

42. Документация светодиода XQ-E [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.cree.com/led-components/media/documents/ds-XQE.pdf (дата просмотра) 19.05.2017.

43. ГОСТ 4784-97. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. – Москва: Стандартинформ, 2009. – 21с.

44. Характеристика сплава АД 31 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://metallicheckiy-portal.ru/marki_metallov/alu/AD31 (дата просмотра) 19.05.2017.

45. Вентилятор ebm papst 4606 N [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://img.ebmpapst.com/products/datasheets/AC-axial-fan-4606N-ENU.pdf (дата просмотра) 19.05.2017.

46. Вентилятор Ebm papst 414 JH [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://img.ebmpapst.com/products/datasheets/DC-axial-fan-414JH-ENU.pdf (дата просмотра) 19.05.2017.

47. Вентилятор Sunon PMD 1238 PQB1-A [Электронный ресурс]. – Режим доступа:http://www.lufter.ru/product/kompaktnyj-ventiljator-sunon-pmd1238pqb1-a-38x38x28/ (дата просмотра) 19.05.2017.

48. ГОСТ 29322-92. Стандартные напряжения. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2005. – 7с.

49. Драйвер ARJ-DALI-100 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://svetlovsem.ru/articles_206_6169.html (дата просмотра) 19.05.2017.

50. LAP601050M [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ledpremium.by/upload/iblock/d7b/77278.pdf (дата просмотра) 19.05.2017.

51. Arlight ARJ-KE401050A [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.arlight.ru/upload/iblock/387/3879313182d1de9c0a6dd92ab257b543.pdf (дата просмотра) 19.05.2017.

52. Блок питания FARADAY 18W/12-24V/78AL [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.faraday-el.ru/doc_power-supply/18-36W_12-24v_data-sheet.pdf (дата просмотра) 19.05.2017.

53. ГОСТ 4543-71. Прокат из легированной конструкционной стали. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2005. – 40с.

54. ГОСТ 12.1.003-83. Система стандартов безопасности труда. ШУМ. Общие требования безопасности. – Москва: Стандартинформ, 2007. – 11с.

55. ГОСТ Р МЭК 61140-2000. Защита от поражения электрическим током. – Москва: Госстандарт России, 2003. – 32с.

56. ОСТ 32.120-98. Нормы искусственного освещения объектов железнодорожного транспорта. – Москва, 1998. – 101с.

57. СНиП 23-05-95*. Естественное и искусственное освещение. – Москва: Издательство стандартов, 2011. – 75с.

58. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е изд. – М.: НЦ ЭНАС, 2004. –222 с.

59. СП 2.5.1336-03. Санитарные правила по проектированию, изготовлению и реконструкции локомотивов и специального подвижного состава железнодорожного транспорта.

60. Инструкция по охране труда для локомотивных бригад ОАО “РЖД”. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://jd-doc.ru/2012/dekabr-2012/3963-rasporyazhenie-oao-rzhd-ot-27-12-2012-n-2707r (дата просмотра) 18.05.2017.

61. Федеральный закон № 89 от 1998г. «Об отходах производства и потребления».

62. ГОСТ 14254-96. Степени защиты IP. Пылевлагозащищенность. – Москва: Стандартинформ, 2007. – 36с.

63. НПБ 249-97. Светильники. Требования пожарной безопасности. Методы испытаний. – Москва: ВНИИПО МВД России, 1997. – 16с.

64. Нормы оснащения объектов и подвижного состава первичными средствами пожаротушения. – Москва, 2010. – 80с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Chapter 1. The state of the art of the development of LED spotlights

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ВМ5А	Рымхан А.М.		

Консультант кафедры ЛИСТ

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор кафедры ЛИСТ	Гриценко Б.П.	д.т.н.		

Консультант – лингвист кафедры ЛИСТ

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент каф. иностранных языков ФТИ	Надеждина Е.Ю.	к.п.н.		

Chapter 1. The state of the art of the development of LED spotlights

1.1 Analysis of design of LED spotlights

There are a large number of spotlights that can be used on railway transport.

There is a patent in [5] on the LED light signal device where LEDs are installed in pairs on the board, and as the focusing system uses an optical system containing a plurality of optical elements. In this device, the light source based on LEDs is adaptable to old electrical and optical design of the signaling device based on incandescent bulbs. The disadvantage of this lighting device is that it is not possible to form light beams of high intensity and narrow focus.

More universal is the lighting device proposed in patent [6]. Multicolor combined spotlight comprises a frame with cooling fins and a transparent protective element, means of the conductor with the internal placement of the plates-holders with lamp and diode emitters in the form of IR-diodes, white and color LEDs, some of which are placed at the focuses of the flat Fresnel lenses, made in a checkerboard pattern on a transparent plastic plate installed near the outlet of searchlight lights.

Additional emitters were installed in every area of the transparent plastic plate among the four flat Fresnel lenses in the middle and between the two Fresnel lenses at its edges. However, this lighting device does not produce a narrow light beam of high intensity, because it is not designed to work with high-powered LED system.

Technical parameters of all the aforementioned lighting devices do not conform to Interstate standard GOST 12.2.056-81, which states that the nominal axis luminous intensity of frontal locomotive spotlight should be $(6{,}4\text{-}9{,}6)\times10^{5}$ KD (bright light) and $(0.7 \text{ to } 1.2)\times10^{5}$ KD (dim light), the angle of scattering of the beam should be ~3° [4].

A useful model [7] can be used in various fields, including as a floodlight for railway locomotives. The technical result of the invention is the formation of narrow light beam with a high axial luminous intensity.

Modular design is used for making the spotlight with the required light characteristics. The combination of a certain number of LED modules allows creating spotlight with required luminous intensity. Figure 1.1 demonstrates the principle of formation of a powerful lighting device based on a modular LED system.

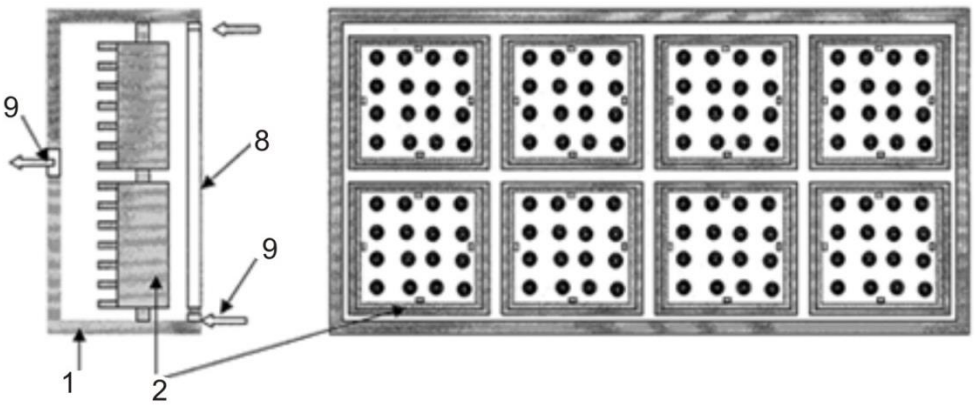


Figure 1.1 - Modular of LED floodlight

Individual LED modules 2 are placed in the frame of a spotlight 1, which is made of metal or composite material with high thermal conductivity. The frame of the floodlight 2 plays the role of an additional heat sink to ensure heat dissipation. Each module has direct thermal contact with the frame of a spotlight (for simplicity it is not shown in the figure). To protect the LED modules from the influence of the external environment, the frame of the floodlight is closed transparent protective globe, which is made of glass or polymer material transparent in the range 0.4-1 μm. The globe may have a coating on the inside to reduce light loss and/or hardening coating on the outer side, to reduce the abrasive effects of dust on the optical element. There are holes 9 in

the frame 1 of the floodlight to provide cooling of the modules via counter – flow of air and provide additional cooling.

Figure 1.2 shows a separate LED module that is used for forming an LED floodlight. The module design includes 1– frame of the module, 2 - PCB, 3 - LEDs, 4 - optical element (for clarity the figure shows only a segment of Fresnel lenses), 5 - control drivers of power LEDs.

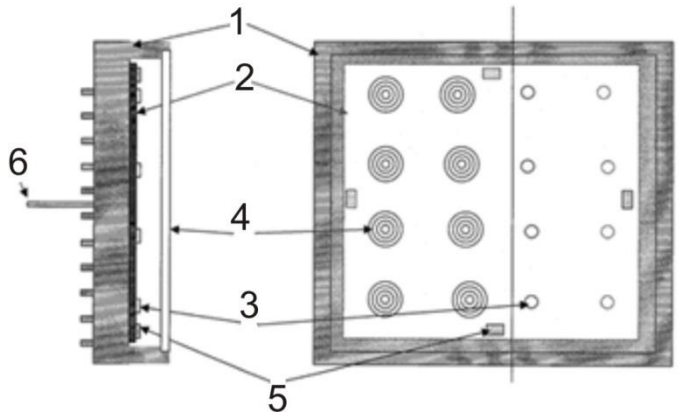


Figure 1.2 - A separate LED module

The frame 1 of the LED module is made of metal or composite thermal interface material. The optical element 4 is attached to the frame (1) via a polymeric (e.g. silicone) adhesives, which allow fixation and adjustment of the optical element to ensure the alignment of the optical axes of the lenses and LEDs.

Printed circuit board 2 with LEDs 3 and drivers' power supply 5 are attached to the heat sink frame 1 using heat – conductive pastes and fixtures. The module is powered via the cable 6. PCB is made of a multilayer system of metallic layers and insulating layers (prepreg) on the metal (ceramic) basis.

An example of the implementation of this utility model is a spotlight LPB – 01. Appearance of the LED spotlight LPB-01 and the locomotive with installed spotlight (replace lamp) are shown in Figure 1.3.

Figure 1.3 – a) Physical configuration of the spotlight LPB-01; b) Electric locomotive EP1M with installed spotlight

The frontal spotlight LPB-01 is designed to illuminate the path in front of the locomotive during dark time. The light sources are high power LEDs white color illumination with a special optical system using Fresnel lenses. To maximize the dissipation and transfer of heat energy LEDs are installed on aluminum board. The frame of the spotlight has a special efficient surface to provide thermal regime of the LEDs. The spotlight has two modes of operation [8]. The general characteristics of the LED spotlight are shown in table 1.

Table 1- General characteristics of the LED spotlight LPB-01

Size, mm	470 x 150 x 380
Weight, kg	18
Power consumption, W	350
The degree of protection from external influences	IP 63
Climatic performance	UHL 1
Resistance to external mechanical influences	M25
Axial luminous intensity, CD	the mode "bright" 800000 ± 10% the mode "dull" 100000 ± 20%
The scattering angle of the beam of the floodlight in the horizontal and vertical planes	2Ѳ/2 = 3°÷ 5° at level of half-intensity

The advantage of this spotlight is the presence of the protective globe with a coating on the inside, which allows to reduce light loss. The disadvantage is large power consumption.

The frontal LED spotlight LPS–55 M is designed to illuminate the path in front of the locomotive at night, installed on both frontal parts of a locomotive ТЭМ9 and ТЭМ7А.

Structurally, the spotlight consists of an optical system and special power supply module connected to the onboard power supply of the locomotive. Optical system is made in the form of a single module placed in steel glass and consists of the optical element, aluminum radiator with forced air cooling system, elements of fixation and adjustment [9].

Optical element is made of three aluminum boards attached to them with the monolithic integrated LEDs, elements protection, and power supply circuit and temperature control. Physical configurationof the floodlight and the locomotive with installed floodlight are shown in Figure 1.4.

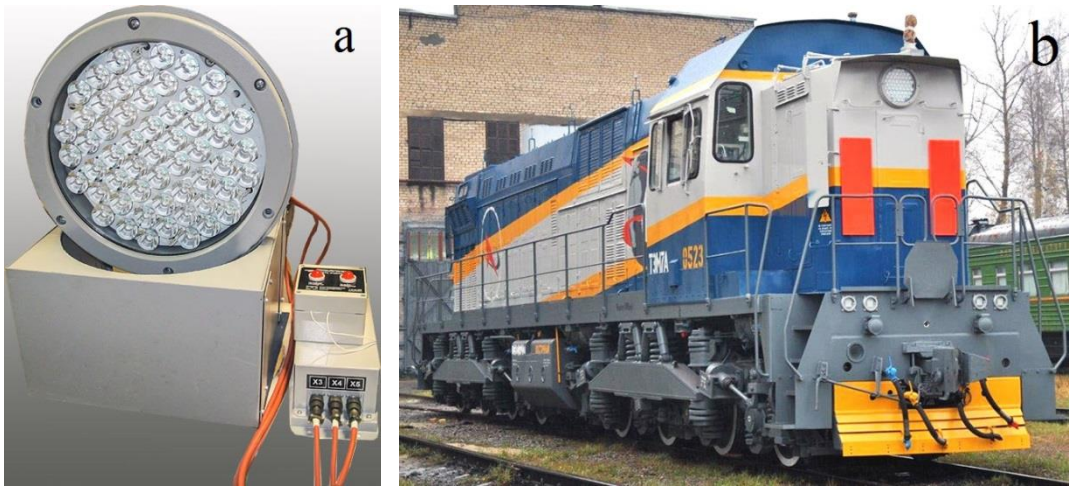


Figure 1.4 – a) Physical configurationof the spotlight LPS-55M and b) Spotlight LPS-55M on the locomotive ТЭМ9

The general characteristics of the LED floodlight are shown in table 2.

Table 2 – Technical parameters of floodlight LPS-55M

Power consumption, W	200
Operating temperature , °C	-50...60
The degree of protection from external influences	Frame IP20, the outer side IP63
Overall dimensions, mm	Spotlight 460x233 power module 345x370x57
Weight, kg	34
The luminous intensity on the optical axis is not less, CD	"bright": 960000, "dim": 80000
Resistance to external mechanical influences	MM1
Color temperature of radiation , K	4000-4500

The spotlight provides the necessary luminous intensity. It has quite small power consumption. The disadvantage of the spotlight is a lot of weight.

Optical system of spotlight proposed in the patent [10] is made in the form of a flat matrix of Fresnel lenses or aspheric lenses with parallel optical axes. The LEDs are installed in focus of the lenses. The optical system of the spotlight has the possibility of adjustment.

The technical solution of the present utility invention is illustrated in figure 1.5. See reference numbers: 1 – frame, 2 – PCB, 3 – LEDs, 4 – optical element (Fresnel lens), 5 – control drivers for powering LEDs, 6 – integrated into the frame cooling system (radiator); 7 – fixing – adjusting system for an optical element 4; 8 – transparent globe; 9 – channels of the cooling system via an external air flow; 10 – contact system for supplying power, control the brightness of the lighting device and to enable forced cooling system; 11 – forced cooling system.

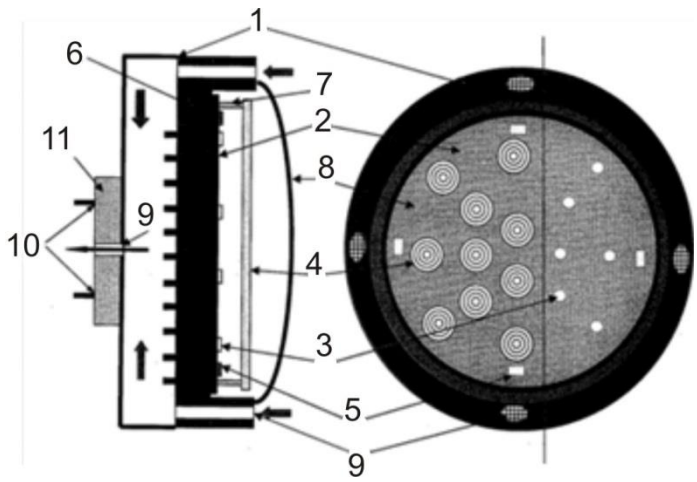


Figure 1.5 – LED spotlight

The frame 1 of the lighting device is made of metal or composite material. The globe (8) is made of transparent polymer material or glass. The globe may have a coating on the inside to reduce light loss and/or hardening coating on the outer side.

The optical element (4) is fixed to the circuit board (2) through the locking device (7), which performs functions of quotation elements for compatibility optical axes of the lenses and LEDs.

The printed circuit board (2) with LEDs (3) and drivers supply (5) is attached to the heat sink element (6) using thermal paste and screws. To provide more effective heat dissipation, there is a system of air channels (9), protected with a mesh (filter) to prevent entry of foreign objects into the cooling system and its contamination.

When the vehicle is moving on which this lighting device is installed, a counter airflow provides additional cooling of the heat sink element (6). If cooling with counter airflow is not enough, a forced cooling system is activated (through temperature sensors) (11), which can be made based on different principles of cooling (e.g., forced ventilation, the cooling by Peltier elements, etc.). PCB is made of a multilayer foil fiberglass on the metal (ceramic) basis (MCPCB) [10].

Modular LED design given in the patent [11] is used in devices projection type mainly for lighting of railway tracks and intertrack spaces.

Modular LED spotlight comprises a protective frame, which has LED modules, power supply. Each LED module contains an optical system with LED sectors, including LEDs, lenses and thermally conductive printed circuit boards based on aluminum. LEDs are installed in focus of lenses. Modular LED spotlight has additional LED module cold standby, which provides independent shutdown and dismantling of one or more defective sectors, as well as the vertical and horizontal adjusters' positions of the optical system. LED modules are placed on the carrier base, which is made in the form of a single flat part or in the form of a welded frame on a metal base with aluminum heatsinks, which allows achieving one pointedness of optical axes. The voltage converter is placed either directly in the frame of the radiator module or in a separate frame. Each sector additionally comprises a removable collapsible focusing assembly, individual for each LED, closing plates, and focusing assemblies consist of an aspherical lens and holder based on polycarbonate.

Aspherical lens is made based on transparent UV-stabilized polycarbonate. Voltage converter is made with stepwise adjustment of the level of light and contains galvanic isolation of LEDs from the mains. The closing plate is made based on polymer material or of the textolite.

Figure 1.6 shows a frontal view of the modular LED spotlight with base in the form of a single smooth part.

1 – LEDs; 2 – a focusing assemblies consisting of an aspherical lens and holder, and representing an optical system of the spotlight; 3 – aspherical lens; 4 – board on the aluminum base; 5 – construction of a power supply in a separate frame;

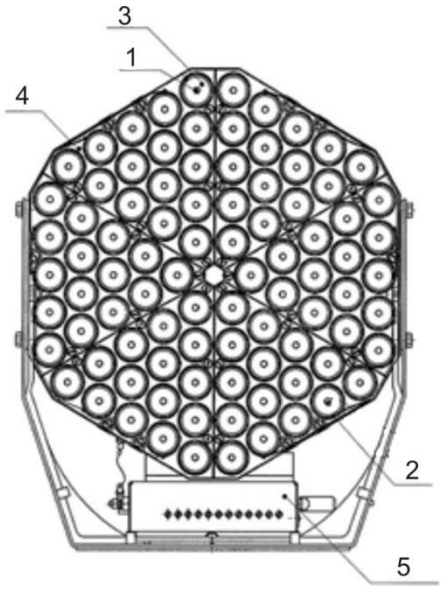


Figure 1.6 – Modular LED floodlight

Level of luminous flux of the modular LED floodlight is discretely adjustable in two positions: "bright" (100%) and "dull" (10%) [7].

The advantage of the modular LED spotlight is the presence of the additional LED module cold standby and the vertical and horizontal adjusters' positions of the optical system.

1.2 Thermal analysis of LEDs

Due to the high light output and a long lifetime (approximately fifty thousand hours), the LED luminaires are very competitive solution. The reliability and output characteristics of LEDs strongly depend on the temperature of the p-n junction. This makes the choice of cooling system or briefly thermal calculation a very important stage of designing the lighting systems based on LEDs.

Unlike traditional incandescent lamps most of the heat (>90%) are transferred from the semiconductor crystal by means of thermal conductivity directly to the metal substrate, that is, to the led frame. Only a very small part of heat is lost in the form of

thermal (infrared) radiation. It is therefore particularly common problem is the design correct and reliable heat dissipation. Wrong thermal mode of the led can lead to undesirable consequences. Primarily, overheating can result in LED failure. All LEDs of CREE critical junction temperature is 150°C. Exceeding this threshold will lead to burnout of the led chip and the long repair process [12].

Second, operation at elevated temperatures reduces the lifetime of the LEDs. Service life — a function of two variables. A graph in Figure 1.7 shows the lifetime as a function of junction temperature for various operating currents.

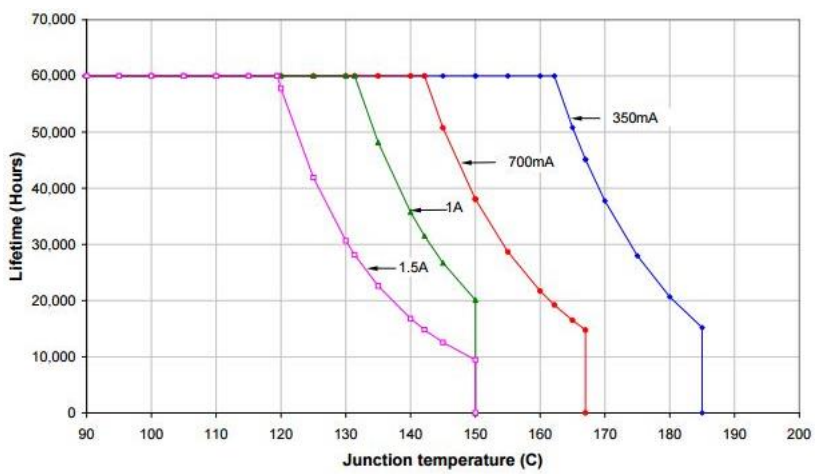


Figure 1.7 - The dependence of the lifetime on the junction temperature and the operating current for the led Luxeon K2 [13]

Service life is defined as the time during which the light output of LEDs decreases to 70% of its initial value. An interesting feature of this graph is that below the critical temperature, in this case 120°C, the service life is constant irrespective of current.

The simplest approach for estimating longevity is to consider the critical temperature as the upper limit of lifetime for a modeling system. Above this border can be used exponential dependence on temperature, because due to the temperature

reliability is the Weibull distribution [13]. This dependence of service life of the led will be:

$$\tau(I_f, T_j) = C_0(I_f)\exp(-mT_j) \quad (1)$$

where τ is service life of the led;

the coefficient C_0 is a function of the direct current;

m is a constant;

T_j is the junction temperature;

I_f is the operating current.

The luminous flux of the LED changes with the change of junction temperature. Below in Figure 1.8 is a chart showing the relative luminous flux versus junction temperature for LED MKR series from the Cree [14]. According to the graph, temperature increases, the light output of the LED decreases, but recovers when the LED cools.

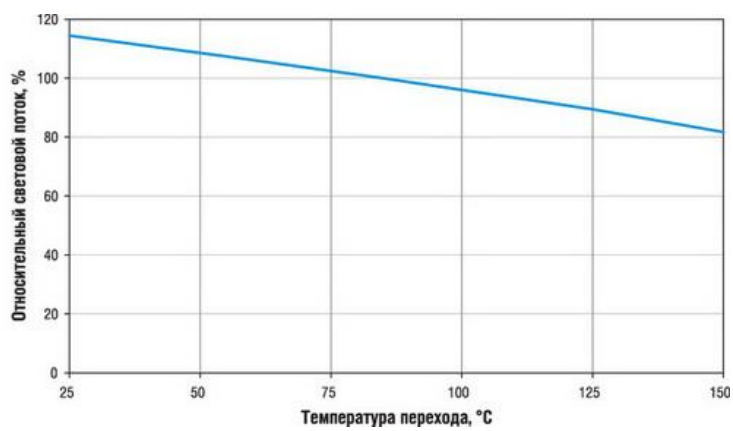


Figure 1.8 - The dependence of luminous flux on the junction temperature for MKR LED

With the change of temperature changes magnitude of forward voltage drop of an LED (V_f). Forward voltage decreases as the junction temperature of an LED increases. Often this dependence is linear with coefficient given in the technical

documentation. For example, this coefficient may be equal to $b_1 = -4{,}5$ mV/K in the range -10...100°C at an initial temperature of board $T_{b,ref}$ = 25°C for led LEW E3A OSRAM [15]. The dependence of voltage on the temperature determined in the following way:

$$V_f(T) = V_f(I_f) + b_1(T_b - T_{b,ref}) \quad (2)$$

Note that not all vendors use the temperature of the board T_b as a control in this ratio, some of them use the junction temperature T_j.

It is assumed that the light power, contained in the light beam, is small. For a more accurate calculation of thermal conditions in the system LED manufacturers should provide information about the actual power dissipated in the radiator. Company Mentor Graphics offers equipment TeraLED for accurate determination of the light power LED. In the absence of such data for the calculation, you can use the energy conversion coefficient η. Note that this coefficient can also depend on the control temperature.

Cree royal blue XLamp LEDs are over 50% efficient and white XLamp LEDs are over 40% efficient. That is, under normal operating conditions, approximately 50% to 60% of the input power is output as heat, while the rest of the input power is converted to light. CREE in the document "Thermal Management of Cree XLamp LEDs" recommends to assume that 75% of power consumption is converted to heat; this assumption allows to be safe when designing a cooling system [16]. Equation 1 below shows how to calculate the thermal power.

$$P_t = 0{,}75 \cdot V_f \cdot I_f \quad (3)$$

where P_t is the thermal power (W);

V_f is the forward voltage of the LED (V);

I_f is the source current to the LED (A).

Mechanism of heat dissipation in the atmosphere of LEDs is more complicated. The cooling system of the LEDs can be illustrated as the equivalent circuits of series and

parallel connected thermal resistances. Below in Figure 1.9 is an equivalent circuit representation of a single LED on a printed circuit board (PCB) installed to a heat sink in ambient air.

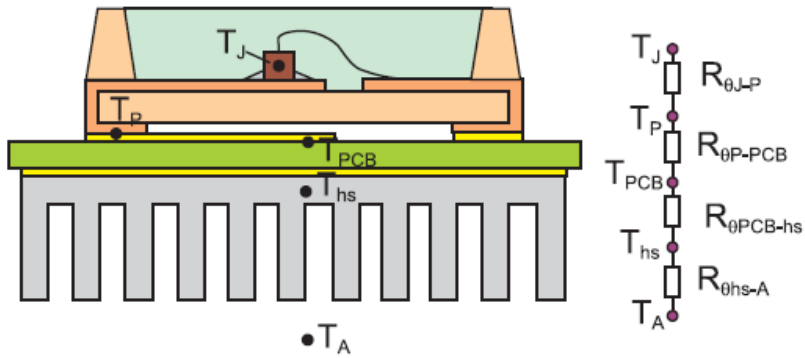


Figure 1.9 - The thermal resistance model for single led

The thermal path of an LED system is formed by a plurality of thermal resistances: "p-n junction – solder point ", " solder point – PCB", "PCB – heat sink ", "heat sink – environment". Then the thermal resistance of the entire cooling system is calculated by the following formula [17]:

$$R_{\theta J-A} = R_{\theta J-SP} + R_{\theta SP-PCB} + R_{\theta PCB-HS} + R_{\theta HS-A} \quad (4)$$

The smaller the value of the total thermal resistance, the better heat is dissipated from the led. Thermal resistance is the ability of the body (surface, layer, or part of it) to prevent the passage of heat flow. Thermal resistance between the elements a and b is calculated by the formula:

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

where $R_{\theta a-b}$ is the thermal resistance from element a to element b (°C/W);

T_a is the temperature of the element a (°C);

T_b is the temperature of the element b (°C);

P_t is the thermal power as calculated in Equation 3.

An equation shown below is most often used to calculate junction temperature T_j:

$$T_j = R_{\theta J-P} \cdot P + T_P \tag{6}$$

where $R_{\theta J-P}$ is the thermal resistance “junction – control point on the case LED”;

P is the power dissipated by the LED;

T_P is the temperature at the control point of the led frame.

The manufacturer in the technical documentation of the LED specifies the thermal resistance between the p-n junction and the solder point.

Work [18] proposes for determining the junction temperature instead the temperature difference at two different points in "junction – heatsink" use time difference in the junction temperature. This approach has a high accuracy in the measurement of the junction temperature. The basic equation of the proposed method can be derived as follows.

Suppose in the initial state the device is applied known thermal power P_{H1}, and in the final state –P_{H2}. In this case, the junction temperature for each of these two states will be equal to:

$$T_{j1} = R_{\theta J-P} \cdot P_{H1} + T_P, \tag{7}$$

$$T_{j2} = R_{\theta J-P} \cdot P_{H2} + T_P \tag{8}$$

Subtracting (7) from (8) we get:

$$T_{j2} - T_{j1} = R_{\theta J-P} \cdot (P_{H2} - P_{H1}) \tag{9}$$

After conversion we get:

$$R_{\theta J-P} = \frac{\Delta T_j(t)}{\Delta P_H} \tag{10}$$

where $\Delta T_j(t) = T_j(t_2) - T_j(t_1) = T_{j2} - T_{j1}$;

$\Delta P_H = P_{H2} - P_{H1}$.

The equation (10) shows that thermal resistance can be calculated from the difference between the initial and final stationary value of the junction temperature and a corresponding change in thermal power at the junction (Figure 1.10).

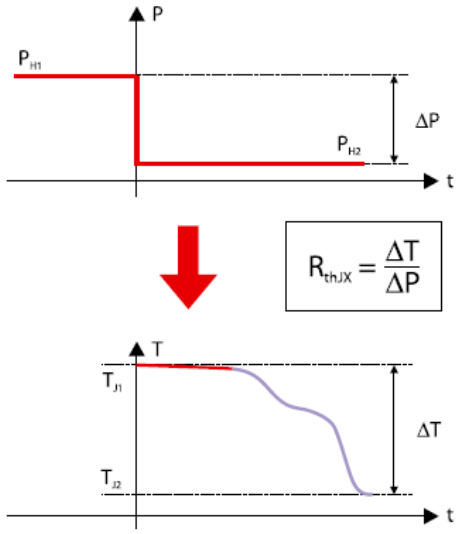


Figure 1.10 - The thermal resistance «junction – point X», calculated from the time difference of the junction temperature and power dissipated in the device

Consider in more detail that the contribution to the total thermal resistance enter elements such as printed circuit board, the thermal interface material and the heat sink.

Printed circuit board. Most Cree's XLamp LEDs are required to be installed on a PCB to provide electrical and mechanical connections to additional components such as the driver and heat sink. The thermal resistance largely depends on the choice of PCB material and topology.

FR-4 is one of the most commonly used materials in the manufacture of printed circuit boards; however, has a very low conductivity. Figure 1.11 below shows a typical cross-sectional geometry for a two-layer FR-4 board.

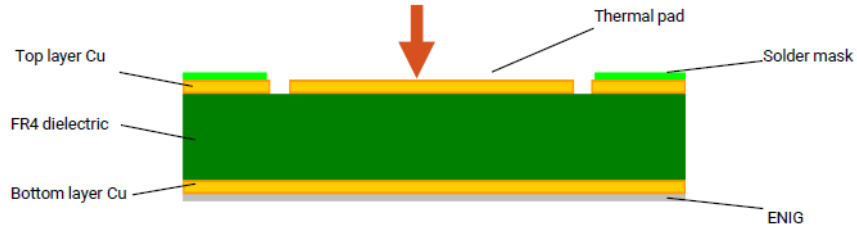


Figure 1.11 – FR-4 board cross-sectional geometry

Using the thermal conductivity and the layer thickness values in Table 3 below, the total thermal resistance for an FR-4 board can be calculated by adding the thermal resistances of the layers.

$$\theta_{PCB} = \theta_{layer1} + \theta_{layer2} + \theta_{layer3} + \ldots + \theta_{layerN} \tag{11}$$

Table 3 - Typical thermal conductivities of FR-4 board layers

Layer/Material	Thickness (μm)	Thermal conductivity (W/mK)
SnAgCu solder	75	58
Top layer copper	70	398
FR-4 dielectric	1588	0,2
Bottom layer copper	70	398

For a given layer the thermal resistance is given by the formula:

$$\theta_{layer} = l/(k \times A) \tag{12}$$

where l is the layer thickness;

k is the thermal conductivity;

A is the area normal to the heat source.

For a 1,6mm thick starboard approximately 270 mm^2, the calculated through-plane thermal resistance is approximately 30 ºC/W [19].

A simple one-layer MCPCB is comprised of a solder mask, copper circuit layer, thermally conductive dielectric layer, and metal core base layer, as shown below in Figure 1.12. Thermal resistance for a 1.6-mm-thick starboard of approximately 270 mm^2 is roughly 0.2 ºC/W.

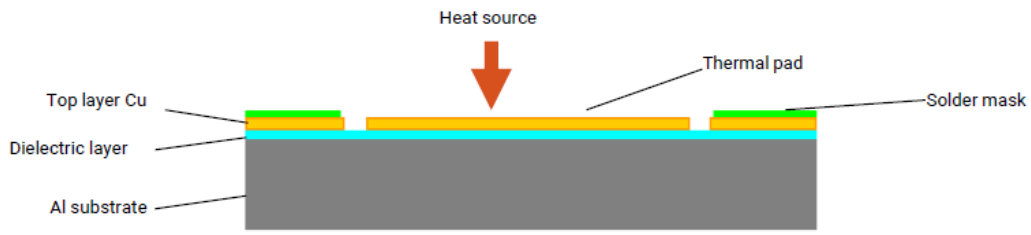


Figure 1.12 – MCPCB cross-sectional geometry

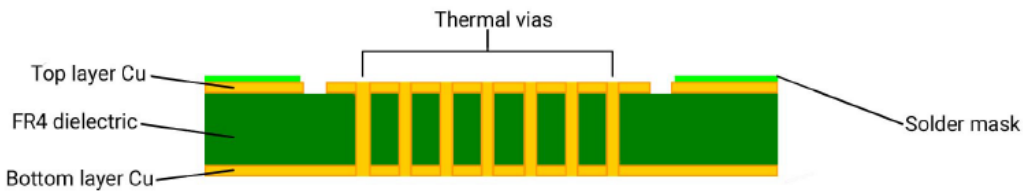


Figure 1.13 – FR-4 cross-sectional geometry with thermal vias

In [20] were given recommendations to improve thermal conductivity of PCB type FR-4. One of them is drilling the holes between conductive layers and their subsequent copper plating (Figure 1.13).

For board size 270 mm2 with five holes Ø0.6 mm the total thermal resistance is approximately 12 °C/W, which is much better than the initial resistance value of the same circuit board without holes – 30 °C/W.

The diagram in Fig. 1.14 illustrates the dependence of the thermal conductivity on changes in the diameter and number of holes. This chart assumes the vias are filled with SnAgCu solder. As expected, the larger the diameter of the via, the lower the thermal resistance becomes [20].

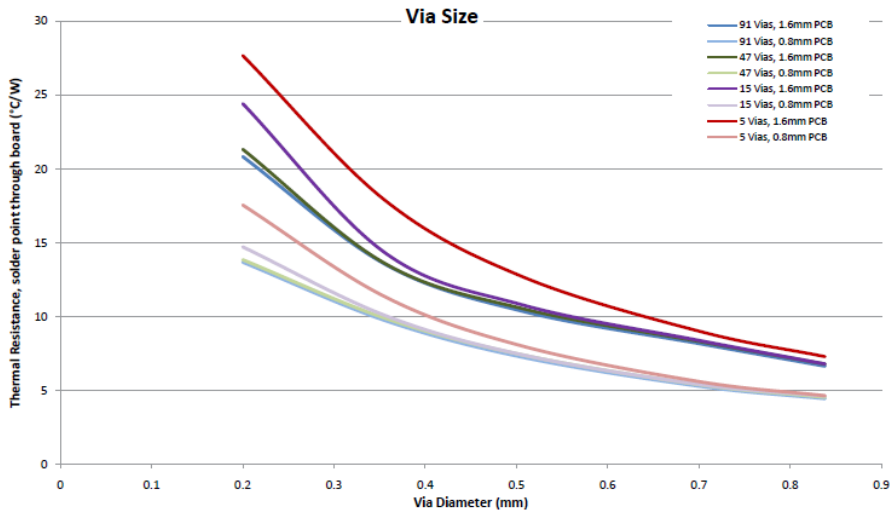


Figure 1.14 – FR-4 PCB with various via diameters and numbers of vias

Thermal interface materials (TIMs) are needed to create good thermal contact between the PCB and the heat sink or between the LED and heatsink. TIMs not only provide a thermal interface between the PCB and the heat sink, but depending on the application, these can have other functions as well, such as electrical insulation or making a mechanical connection. The main thermal interface materials include thermal paste, materials with phase change, gels, hot melt.

Many characteristics must be considered when selecting a TIM, not just the thermal conductivity. Often overlooked is the bond line thickness of the material, and as shown above in equation 5, the thermal resistance of the material is highly dependent on this thickness. Sometimes a thinner TIM with poor thermal conductivity has a lower thermal resistance than a thicker TIM with better thermal conductivity. Both these attributes must be considered when selecting a TIM.

The heat sink is the last and most influential part of the cooling system, and is needed to first conduct heat away from the PCB or directly from LEDs and then to convect and radiate heat to the ambient air. Thus, the first task of the heat sink necessitates that the heat sink be fabricated from a high thermal conductivity material to conduct heat away. The second task requires that the heat sink have a large surface area

to convect heat to ambient and also have good emissivity so it can radiate heat away. Anodized aluminum heatsink has a large thermal emissivity. In addition to cooling, the radiator may also perform other functions, most often it can act as a frame or holder.

From domestic manufacturers of aluminum heat sinks can be highlight the St. Petersburg firm LIGRA, which produces a wide range of needle and finned heat sinks.

The main disadvantage of cooling system on the basis of aluminum heat sink is a multi-layered. Multilayered design has characteristic of the associated transient thermal resistance, which although can be minimised through the use of special heat-conductive material (insulating plates, pastes, adhesives, materials for filling of air spaces, etc.), however, it leads to an increase in the junction temperature [21].

Traditionally heat sinks made of metal with high thermal conductivity and their alloys are used for cooling. According to the latest results obtained in the field of polymer compounding, it can be argued that in the near future will be widely used heat – dissipating polymer composites (HDPC) with a thermal conductivity many times, tens or hundreds of times greater than the conductivity of conventional plastics. Such sharp increase of heat conductivity HDPC is achieved through the use of fillers with high thermal conductivity (250 W/MK), special equipment for their filling and selection of special technological additives [22].

As international experience shows, the use of heat dissipating polymer composites to solve thermal stability enables to improve the reliability of LED lamps, to reduce the cost of their production. The use HDPC is appropriate in the design of the LEDs themselves and in the design of its lamps.

American firm Lynk Labs patented technology ThermaLynk that uses HDPC as the structural basis of the LED Chip (figure 1.15a). The crystal is mounted directly into a monolithic module (substrate – heat sink), made of HDPC. This solution greatly simplifies the traditional design of the LED and reduces the number of components. In this construction, heat from the crystal directly without any intermediate elements is transferred and dissipated by only one element made of HDPC. The specific form, the

dimensions of the heat transfer fins can easily vary and be customized for a specific application. It is quite clear that this approach reduces the cost of the LED, allows to increase the radiation power of the light [22].

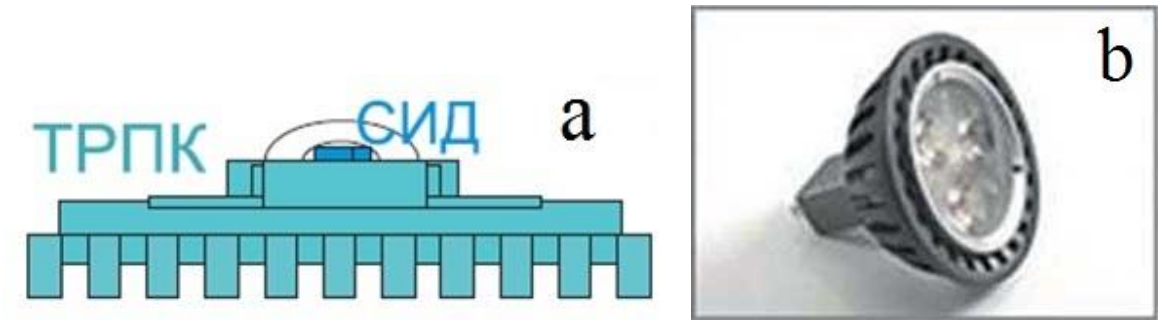


Figure 1.15 – a) Promising (low-order) the LED structure on the basis of HDPC; b) MR16 lamp with frame HDPC

Using heat – dissipating polymer composites for cooling can significantly reduce the weight of LED products. For example, Philips developed a series of innovative lamps MR16, almost all made of heat-dissipating plastic company DSM (USA) (Fig.1.15 b).

If natural cooling is not enough for heat dissipation, it is necessary to use active cooling. There are many types of active cooling systems, from fans to liquid cooling to heat pipes to other exotic methods. If the use of active cooling is unavoidable, it should be noted that the LEDs can operate for tens...hundreds of thousands of hours, so should provide a security system that protects LEDs from overheating in case of failure of the active cooling devices. Otherwise, the failure of active cooling devices almost immediately entail the failure of the LEDs due to overheating. In addition to the service life, the important parameters are efficiency, reliability, low noise, price, ease of maintenance, power consumption. Often, the active cooling devices require additional power; this reduces the efficiency of the system as a whole.

For effective cooling, the radiator is often supplemented by a fan. This kind of air-cooling is relatively inexpensive, but due to the generation of audible noise is of limited use. To overcome this disadvantage and to reduce the size of cooling system was developed inkjet technology of the blowing radiator [23]. For example, developed by company Nuventix inkjet cooling system SynJet for LED ensures thermal resistance in the range 0,75...a 2.65 K/W. It has a low level of generated noise and small size. The working principle of these systems is based on periodic cooling fins of the heat sink with pulsed turbulent airflow. This heat dissipation method is more effective than blowing with a steady flow of air.

In powerful LED spotlights, video projectors and special lighting devices power dissipation might be hundreds of watts. In such cases, the only solution is using liquid coolers, which allow reducing the thermal resistance of the heat sink to the required tenths-hundredths K/W [24]. A special design of the LEDs was developed that provides direct liquid cooling of the LED chip based on a standard led frame [25]. The dissipation of heat in this case is carried out in two ways: first, through the led frame (the traditional way), the second through the upper surface of the LED chip due to the flow of fluid in the chamber between the surface of the chip and a domed lens.

It should be noted that the cooling system of the LED sometimes is complemented by a Peltier element, which is installed between the frame of the led and the heat sink. However, the Peltier element is not applicable in cooling systems of high power LEDs, since it has low efficiency [26].

1.3 The vibration of the spotlight

For many areas of the economy one of the important tasks is to increase the service life of lighting devices operating in extreme conditions. Lighting devices working in heavy industry, ports, mines, bridges, streets with active traffic, railways,

construction sites, agricultural buildings, sports complexes and other structures are exposed to vibration and shock loads.

Railway vehicles and objects of railway infrastructure [27-29], as well as port, construction and industrial lifting equipment are objects with extreme parameters of vibration condition. In such circumstances, the reliability of the lighting device installed on such objects depends on the ability of the design of the lighting device to withstand various vibrations.

Trouble-free operation life of the incandescent bulbs used in marine navigation lights and lighting spotlights of construction cranes, in the first case the average is -1500 hours and the second days.

Based on the analysis of ways to increase trouble-free service life of lighting devices, can be highlighted two ways of increasing the reliability of lighting devices: the first is development and implementation of a more reliable light sources, the second is extensive use in the design of the lighting device damping alloys, and plastics [30].

To determine the vibration resistance of various constructions, including vibration resistance of the lighting devices, in Russia there are different methods of physical tests regulated by GOST R IEC 60598-1-2011[31]. When testing for vibration resistance in accordance with domestic and European standards the design is subjected to harmonic and random vibration with various frequencies spectra and with various amplitudes. The process of conducting such tests is long and expensive.

In [32] considers the design of railway spotlights with LED light sources, which allows adjusting the light output. The design of the spotlight provides replacement and adjustment of the LEDs during operation of the railway vehicle. The necessary lighting characteristics of spotlight are provided with secondary optics that are installed over each LED, as well as the use of a central lens.

The spotlight in [32] was originally designed to use incandescent bulbs. Replace incandescent lamps in series locomotive spotlight to LED light sources is associated with certain difficulties.

In the upgraded design of spotlight the weight of the whole structure increases at the expense of detail, designed for mounting and adjustment installation of LEDs, and elements of cooling systems. All these circumstances lead to a change in spatial coordinates of the center of mass of the structure, resulting in changing range of natural frequencies of the upgraded spotlight.

The task of equipping serial designs of locomotive spotlights with LED light sources is further complicated by the security requirements of the railways applicable to railway lighting devices (GOST 12.2.056-81 "System of occupational safety standards. Electric and diesel locomotives of 1520 mm. safety Requirements"). The photometric characteristics of the upgraded spotlights may not correspond with the specified requirements because of resonances of the structure.

In work [32] analysis of natural frequencies of the proposed design was not carried out.

The considered causes indicate the need for optimization of design solutions of the upgraded spotlights based on the analysis of natural frequencies of its structure. This analysis can indicate directions and means of increasing the vibration resistance of the construction of the railway spotlight.

In [27] presented the design of LED spotlights, in which LED light sources are installed in the focus of a parabolic reflector. Common external reflector converts the luminous flux generated by the reflector of each LED into a luminous flux with a peak distribution of light intensity. This design of the lighting device can be used for illumination of aircraft landing gear.

Typically, such design consists of a large number of constituent elements. This can lead to the possibility of the emergence of various resonances of the structure during its operation.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(чертежи прожектора)