

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Уральский государственный университет путей сообщения»  
ФГБОУ ВПО УрГУПС

На правах рукописи

ХАРИТОНОВ ИГОРЬ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ  
ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ УСТРОЙСТВ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ  
ЛОКОМОТИВА НА ОСНОВЕ СВЕТОДИОДОВ**

Специальность 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог,  
тяга поездов и электрификация (технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор  
Сергеев Борис Сергеевич

Екатеринбург – 2015

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ .....	10
1.1 История развития и современное состояние светодиодной техники локомотива.....	10
1.2 Особенности применения светодиодов в светосигнальной системе безопасности локомотива.....	13
1.3 История развития и современное состояние атмосферной оптической связи.....	21
1.4 Выводы по обзору литературы.....	27
ГЛАВА 2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЕТОДИОДОВ В УСТРОЙСТВАХ ОБЩЕГО ОСВЕЩЕНИЯ КАБИН МАШИНИСТА ЛОКОМОТИВА.....	29
2.1. Оптимизация системы общего освещения кабины машиниста устройствами на основе светодиодов .....	29
2.2. Анализ системы общего освещения кабины машиниста локомотива на примере маневрового тепловоза .....	39
2.3. Анализ применения изменения спектра излучения освещения кабины машиниста.....	44
2.4 Выводы по главе .....	47
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ СВЕТОДИОДОВ ДЛЯ ПРОЖЕКТОРА ЛОКОМОТИВА.....	49
3.1. Общие вопросы разработки прожектора на основе светодиодов .....	49
3.2. Анализ геометрии узкоградусной оптики для светодиода с учетом потерь света.....	53
3.3. Практические результаты разработки оптической системы прожектора .	73
3.4 Выводы по главе .....	81

ГЛАВА 4. ИННОВАЦИОННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВЕТОДИОДНОЙ ТЕХНИКИ НА ЛОКОМОТИВАХ .....	83
4.1. АНАЛИЗ ВОПРОСОВ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ДВИЖЕНИИ ЛОКОМОТИВА В КРИВЫХ.....	83
4.2. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЖЕКТОРА ЛОКОМОТИВА С ФУНКЦИЕЙ ИЗМЕНЯЕМОЙ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ.....	92
4.3. ВАРИАНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ШИРИНОЙ ЛУЧА ПРОЖЕКТОРА ..	99
4.4. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ЛОКОМОТИВА ЧЕРЕЗ АТМОСФЕРНУЮ ОПТИЧЕСКУЮ ЛИНИЮ СВЯЗИ.....	112
4.5. ВЫВОДЫ.....	123
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	124
ОСНОВНЫЕ СОКРАЩЕНИЯ И УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	126
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	127
ПРИЛОЖЕНИЕ А ДОКУМЕНТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	141

# ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение безопасности движения поездов является ключевой задачей в системах управления процессами перевозок на железнодорожном транспорте

Элементы безопасности на железнодорожном транспорте во многих случаях характеризуются постоянством в реализации, что объективно можно объяснить существовавшими традициями, которые сложились на протяжении многих десятилетий и которые до недавнего времени полностью удовлетворяли требованиям, предъявляемым к этим устройствам.

В частности, до недавнего времени практически вся светотехника устройств автоматики и телемеханики выполнялась на основе применения ламп накаливания (ЛН). За последнее десятилетие происходило бурное развитие светотехнических изделий на основе светодиодов (СИД) и светодиодных матриц (СДМ). Основные преимущества, которые позволили данным изделиям внедриться практически во все виды светотехнических изделий заключаются в следующем: большое время безотказной работы, собственное излучение в различных спектральных диапазонах, различные размеры светового тела (СТ), различные диаграммы направленности (ДН) собственной и вторичной оптики, высокая световая отдача.

Первыми преобразованию подверглись изделия сигнализации централизации блокировки (СЦБ) напольной аппаратуры – светофоры. Сейчас все больше технических решений на основе светодиодов можно встретить и на подвижном составе (ПС) железнодорожного транспорта, например, головной источник света (прожектор), внутреннее освещение кабины машиниста и сигнальные (буферные) фонари. Кроме того, в последние несколько лет развивается направление применения высокоскоростной передачи информации путем использования открытых оптоэлектронных каналов.

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время на сети железных дорог РФ происходит широкое внедрение устройств оптоэлектроники и, в частности, светодиодной техники. Очевидно, что это коснулось и подвижного состава. Современное состояние и подход к разработке оптоэлектроники локомотивов имеет ряд недостатков. Стандартные системы общего освещения локомотива имеют значительные габариты, что негативно сказывается на качестве освещения рабочего места машиниста и приводит к наличию паразитных отражений в лобовых окнах кабины. Для решения поднятых вопросов возникает необходимость увеличения размеров кабины машиниста и проектирования сложных конструкций остекления.

Применение ламп накаливания в существующих лобовых прожекторах локомотива приводит к значительному числу их отказов, что негативно влияет на безопасность и график движения. Диаграмма направленности излучения существующего прожектора недостаточно освещает впередилежащий путь и не позволяет машинисту оперативно реагировать на опасность. Кроме того, в кривых луч лобового прожектора не освещает впередилежащий участок пути, из-за чего существенно снижается безопасность. Большая яркость излучения лобового прожектора ослепляет встречную локомотивную бригаду, что обуславливает ухудшение условий безопасности.

В настоящее время использование прогрессивных линий связи на основе оптических элементов для нужд локомотива ограничено. Известно применение атмосферных оптических линий связи, однако применение их на железной дороге имеет ряд нерешенных технических вопросов. В частности, имеется проблема точного наведения источника сигнала на приемник, а также ряд других.

В решении поставленных задач заключается актуальность выполненной диссертационной работы.

Актуальность темы подтверждают следующие отраслевые документы:

- Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года [1];

- Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года [2];
- Концепция информационной подсистемы многоуровневой системы управления и обеспечения безопасности движения поездов (АСУ МС) [3].
- Концепция комплексной программы «Внедрение светодиодной техники в ОАО «РЖД» [4].

**Степень разработанности темы исследования.** В области создания новой аппаратуры на основе светодиодов и решения комплексных вопросов ее применения на железнодорожном транспорте наибольший вклад был внесен сотрудниками следующих научных организаций и вузов: ВНИИАС, ВНИИЖГ, ВНИИЖТ и рядом других. Среди отечественных ученых в этом отношении следует отметить Е.Н. Розенберга, М.А. Мурашову, С.Е. Ададунова, Ю.М. Инькова, Б.С. Сергеева. На развитие светодиодной техники оказали существенное влияние труды следующих авторов: Д.А. Закгейма, Y. Narukawa, Ф.Е. Шуберта. На развитие светотехники оказали влияние труды следующих авторов: Ю.Б. Айзенберга, В.В. Трембача, Б. Н. Бегунова. Теоретические основы открытых оптических каналов связи и оптики атмосферы описаны в трудах следующих авторов: А.Л. Дмитриева, В.М. Вишневого. В своих исследованиях автор опирался на работы перечисленных ученых и инженеров.

**Целью диссертационной работы** является повышение безопасности движения за счет применения устройств оптоэлектроники локомотива на основе светодиодов.

**Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:**

1. Разработаны системы светильников общего освещения, обеспечивающие безопасность движения локомотива.
2. Проведен анализ направлений разработки модульного узкоградусного прожектора для локомотива с точки зрения минимизации потерь во вторичной оптике.
3. Разработана оптическая система модульного широкоградусного прожектора на основе светодиодов и способ изменения его кривой силы света

(КСС), обеспечивающие повышение безопасности движения в кривых и исключая ослепление встречной локомотивной бригады.

4. Сформулировать принцип реализации атмосферной оптической линии связи (АОЛС) в качестве дополнительного канала связи между подвижным составом и напольным оборудованием железных дорог.

**Объектом исследования** являются специальные электротехнические установки и системы управления ими.

**Предмет исследования:** обеспечение безопасности подвижного состава.

**Научная новизна** работы определяется следующими полученными результатами:

1. Предложены и научно обоснованы принципиально новые виды систем светильников общего освещения, исключая возникновение паразитных отражений на лобовых стеклах кабины машиниста на основе предложенных оптических моделей кабины машиниста.

2. Предложена методика разработки модульного узкоградусного прожектора локомотива с точки зрения минимизации потерь во вторичной оптике.

3. Предложена и научно обоснована новая широкая КСС для модульного прожектора подвижного состава и способ ее изменения, обеспечивающие безопасность движения в кривых и исключая ослепление встречной локомотивной бригады.

4. Предложен принцип реализации АОЛС для передачи телемеханической информации между подвижным составом и напольным оборудованием железных дорог.

**Теоретическая и практическая значимость** работы определяется следующими полученными результатами:

1. Разработаны новые виды систем светильников общего освещения, соответствующие требованиям безопасности и позволяющие упростить конструкцию кабины машиниста маневрового тепловоза с кузовом капотного типа.

2. Предложен прожектор подвижного состава с широкой КСС и система управления для него, позволяющие повысить безопасность движения при

движении в кривых и исключить ослепление встречной локомотивной бригады, а также позволяющий внедрить АОЛС для передачи информации между локомотивом и напольным оборудованием.

3. Разработана модульная узкоградусная система прожектора, позволяющая снизить потребление энергии от системы электроснабжения локомотива в 3,57 раза (внедрена в опытную эксплуатацию), и в 20 раз (опытные образцы) по сравнению со стандартным прожектором на основе ЛН. Модульный принцип построения позволяет системе оставаться работоспособной и позволяет безопасно продолжить движения при отказе отдельных модулей.

4. Разработанные системы светильников общего освещения и прожекторов на основе светодиодов внедрены на несколько серий электровозов и тепловозов, а также на газотурбовоз ГТ1Н, всего более 200 локомотивов, применяемых на железных дорогах общего и необщего пользования.

**Методология и методы исследования.** В ходе исследования автором применялись методы аналитической геометрии, геометрической оптики, теории оптических систем, математического моделирования, физического моделирования, а также эксперимент.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Системы светильников общего освещения, разработанные на основе предложенных оптических моделей кабины машиниста.

2. Модульная узкоградусная система прожектора на основе светодиодов, позволяющая значительно снизить потребление энергии.

3. Модульный прожектор локомотива с широкой КСС и система управления его светораспределением, позволяющие повысить безопасность движения в кривых и исключить ослепление встречной локомотивной бригады.

4. Принцип реализации АОЛС для передачи информации между локомотивом и напольным оборудованием железных дорог, позволяющий повысить достоверность передаваемой информации.

**Степень достоверности** полученных результатов диссертационной работы подтверждается корректным использованием выбранного математического

аппарата на современном уровне математической строгости, апробированием результатов диссертационных исследований на научных конференциях, семинарах и внедрением в опытную эксплуатацию.

**Апробация результатов.** Результаты исследований докладывались и обсуждались на:

- третьей научно-технической конференции с международным участием ИСУЖТ-2014 (Москва 2014);

- четвертой научно-технической конференции с международным участием ИСУЖТ-2015 (Москва 2015);

- периодических научно-технических семинарах аспирантов УрГУПС (Екатеринбург 2014, 2015);

- периодических научно-технических семинарах кафедры «Электрические машины» УрГУПС (Екатеринбург 2014, 2015).

- расширенном заседании кафедры «Электрические машины» УрГУПС (Екатеринбург 2015).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 6 статей (из них 3 в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации научных результатов диссертационных исследований), 5 патентов РФ.

**Объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка основных сокращений и обозначений, списка литературы, состоящего из 143 наименований. Текст диссертации содержит 143 страницы, включает 57 рисунков с графиками и иллюстрациями и 3 таблицы.

## Глава 1. Обзор литературы

### 1.1 История развития и современное состояние светодиодной техники локомотива.

Светодиод — полупроводниковый источник некогерентного оптического излучения, принцип действия которого основан на явлении электролюминесценции при инжекции неосновных носителей заряда через гомо- или гетеро-  $p$ - $n$  переход [5-7]. Состав и физические свойства гетероструктуры определяют длину волны излучения светодиодного чипа.

Начало истории светодиодов видимого диапазона датируется 1962г. после открытия излучения  $p$ - $n$  перехода GaAsP. Серийный выпуск был налажен фирмой Монсанто в 1968г. Светодиодные кристаллы, выпускаемые этой фирмой, излучали в красном спектре [8].

В 1969г. были созданы первые монокристаллы GaN в аммиачной среде методом газофазной эпитаксии при температуре 850 °C [9]. Исаму Икасаки с соавторами в 1985 г. получили бездефектный GaN на сапфировой подложке используя газофазную эпитаксию из металлоорганических соединений [10]. В 1992г. было показано, что на квантовый выход нитридных светодиодов не влияет большая концентрация дислокаций, в отличие от светодиодов на основе арсенидов и фосфитов [11]. Кроме того, система InGaN/GaN может быть применима для создания белых светодиодов. [12, 13].

Современные светодиоды могут быть классифицированы по нескольким принципам:

- 1) по корпусу: круглые, овальные, специальной формы;
- 2) по цвету: одноцветные, белые, многоцветные;
- 3) по мощности: до 0,5 Вт, до 1 Вт, более 1 Вт;

- 4) по количеству кристаллов: однокристалльные, многокристалльные;
- 5) по типу КСС: широкая, косинусная, глубокая и т.п.

В настоящее время светодиоды производятся многими крупными предприятиями, в том числе и российскими: Cree, Inc; Kingbright; OSRAM GmbH; Nichia, ЗАО «Светлана-оптоэлектроника», ЗАО «Оптоган».

В зависимости от места применения изделия на основе светодиодов, для обеспечения оптимального светораспределения, кроме собственно светодиодов, обычно применяются элементы вторичной оптики, основная задача которых – перенаправить свет светодиода в нужном направлении.

Среди производителей вторичной оптики можно отметить: Ledil Oy, Carclo Optics, Ledlink Optics Inc. Вторичная оптика производится на основе различного рода пластиков, силикона или алюминия.

Одной из проблем, препятствующей широкому внедрению светодиодных систем на железнодорожном транспорте, является высокая стоимость изделий, обусловленная, прежде всего, стоимостью самих светодиодов. Несмотря на это, рынок светодиодных изделий интенсивно растет. Рост рынка происходит благодаря возможности высокой денежной отдачи за счет низкой стоимости обслуживания и высокой энергетической эффективности предлагаемых изделий.

Другой проблемой, препятствующей широкому использованию светодиодных изделий является слабая нормативная база, которая начала развиваться относительно недавно. Большинство стандартов для железных дорог на территории РФ были изданы в 80-х годах. Однако в последние годы большинство из них претерпели переиздание [14-18]. Следует отметить, например, что требования к сигнальному и осветительному оборудованию ПС в зарубежных стандартах намного ниже, чем у нас [19, 20].

Новыми исследованиями и переработкой стандартов для железных дорог в РФ занимаются такие институты как: ВНИИЖТ, ВНИИЖГ, ВНИИАС [21]. Данные стандарты регламентируют координаты цветности, цветовую температуру, тип применяемых излучателей, углы распространения света, уровни освещенности и силу света изделий, применяемых в тех или иных областях на железной дороге.

В США подобными исследованиями занимаются научно–исследовательские институты: ITE, Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute. Их исследования ведутся по следующим направлениям [22-25].

В России изготовлением светодиодного светотехнического оборудования для ПС железной дороги занимаются такие предприятия как: ЗАО «Транс-Сигнал», ООО «Балтик Траст», ООО «Корвет-Лайтс». Среди зарубежных компаний-производителей можно отметить: Helmholtz & Pauli GmbH, MSV elektronika s.r.o., Pintsch Vamag GmbH [26-31].

ЗАО «Транс-Сигнал» выпускает для ПС железной дороги сигнальные (буферные) фонари красного и белого цветов. Принцип их работы заключается в использовании узкоградусных светодиодов в паре с фокусирующими цилиндрическими линзами. Эффект заключается в дополнительном увеличении осевой силы света за счет уменьшения расходимости светового пучка по вертикали.

ООО «Корвет-Лайтс» выпускает светильники для освещения внутренних помещений, буферные фонари, лобовой прожектор. Буферные фонари выпускаются в совмещенном корпусе, стекло выполнено рельефным для уменьшения габаритной яркости. Прожекторы выпускаются в двух модификациях: ЛПБ-01 характеризуется применением модульной конструкции и линзы Френеля, ЛПБ-03 характеризуется цельным корпусом и применением асферических линз. [27].

ООО «Балтик Траст» выпускает светильники для освещения внутренних помещений, буферные фонари.

Pintsch Vamag GmbH выпускает прожектор для Desiro RUS, характеризующийся применением совместно широкоградусной и узкоградусной оптики [29]

Энергетические и оптические характеристики изделий большинства производителей лежат в одном диапазоне. Потребляемая мощность составляет 10-30 Вт для буферный фонарей, 150-200 Вт для лобового прожектора.

## **1.2 Особенности применения светодиодов в светосигнальной системе безопасности локомотива.**

Для достижения необходимого уровня освещенности пути перед локомотивом нормами безопасности железнодорожного транспорта нормируется осевая сила света прожектора. При этом, нормируется наличие двух режимов работы прожектора «ярко» и «тускло» [32-36], последний включается при движении поездов навстречу друг другу на двухпутных и многопутных участках и при маневрировании на не приемоотправочных путях [37].

Стандартным решением для выполнения норм безопасности является использование узкоградусного прожектора с лампой накаливания (см. рисунок 1.1), например, ПЖ 50-500 (Характеристики: 50В, 500Вт, 11100Лм, среднее время горения: 560ч [38]). Лампа накаливания — электрический источник света, в котором тело накала, помещённое в прозрачный вакуумированный или заполненный инертным газом сосуд, нагревается до высокой температуры за счёт протекания через него электрического тока, в результате чего излучает в широком спектральном диапазоне, при этом, большая часть энергии излучается в красном и инфракрасном спектре. Спектр лампы накаливания приведен на рисунке 1.2 [39].

Трудности применения лампы накаливания на железнодорожном транспорте в первую очередь определяются низким сроком службы изделия. Средний срок службы лампы накаливания обычно указывается для постоянно горящей лампы, дополнительно его сокращает множество факторов, наиболее значительные это нагрузки на спираль со стороны силы Лоненца из-за большого тока, протекающего через нее в момент включения, механические нагрузки, вызванные вибрационным воздействием на нить, нестабильности напряжения питающей сети (особенно в электровозах старых модификаций).

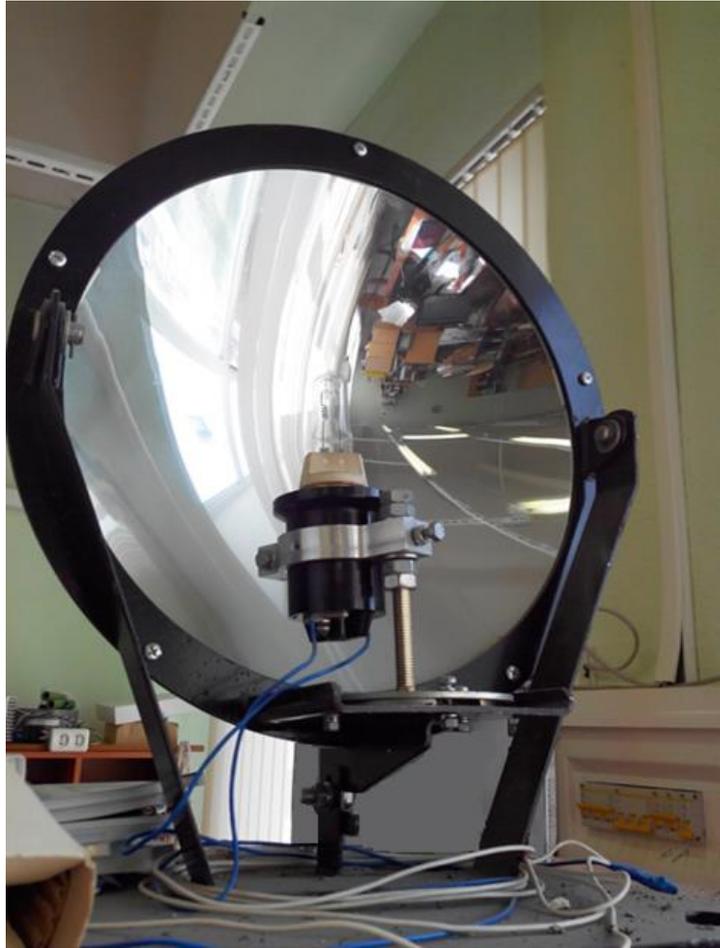


Рисунок 1.1 - Пример конструкции лампового прожектора локомотива.

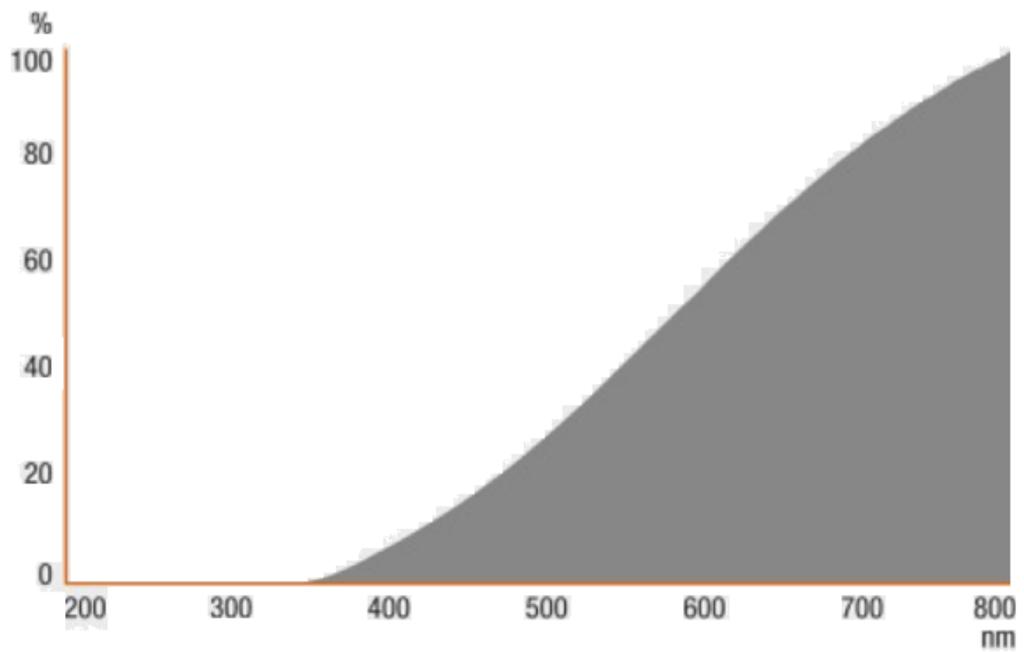


Рисунок 1.2 - Спектр галогеновой лампы накаливания [39]

Параметры светового потока и срока службы лампы накаливания изменяются при изменении питающего напряжения по следующим законам (изменение питающего напряжения не более  $\pm 10\%$ ) [40]:

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = \left(\frac{U}{U_0}\right)^{3.6}, \quad (1.1)$$

$$\frac{\tau}{\tau_0} = \left(\frac{U}{U_0}\right)^{-11.2}, \quad (1.2)$$

где  $\Phi_0$  – световой поток лампы при напряжении  $U_0$ , Лм;  $\tau_0$  – срок службы лампы при напряжении  $U_0$ , ч;  $U_0$  – номинальное значение питающего лампы напряжения, В;  $\Phi$  – световой поток лампы при напряжении  $U$ , Лм;  $\tau$  – срок службы лампы при напряжении  $U$ , ч;  $U$  – реальное значение питающего лампы напряжения, В.

Изменение времени жизни и светового потока лампы при изменении питающего напряжения приведены на рисунке 1.3.

Таким образом, при увеличении питающего напряжения на 10% срок службы сокращается на 63%, а световой поток увеличивается на 41%, при уменьшении питающего напряжения на 10% срок службы увеличивается в 3,25 раза, а световой поток уменьшается на 31%. Становится очевидно, что для обеспечения безопасности движения при помощи прожектора на основе лампы накаливания необходимо использовать дополнительные стабилизаторы напряжения высокой мощности, что негативно отразится на надежности т.к. в схему вводится дополнительный сложный электронный элемент.

Для устранения больших пусковых токов лампы накаливания обычно применяют электронные стабилизаторы с дополнительной функцией плавного запуска нагрузки. Уменьшение вибрационных и ударных нагрузок возможно с помощью различного рода демпферов.

Спектр светодиодов, излучение белого света которых был получен при помощи кристалла, излучающего в синем диапазоне, и люминофора, различной цветовой температуры, представлен на рисунке 1.4.

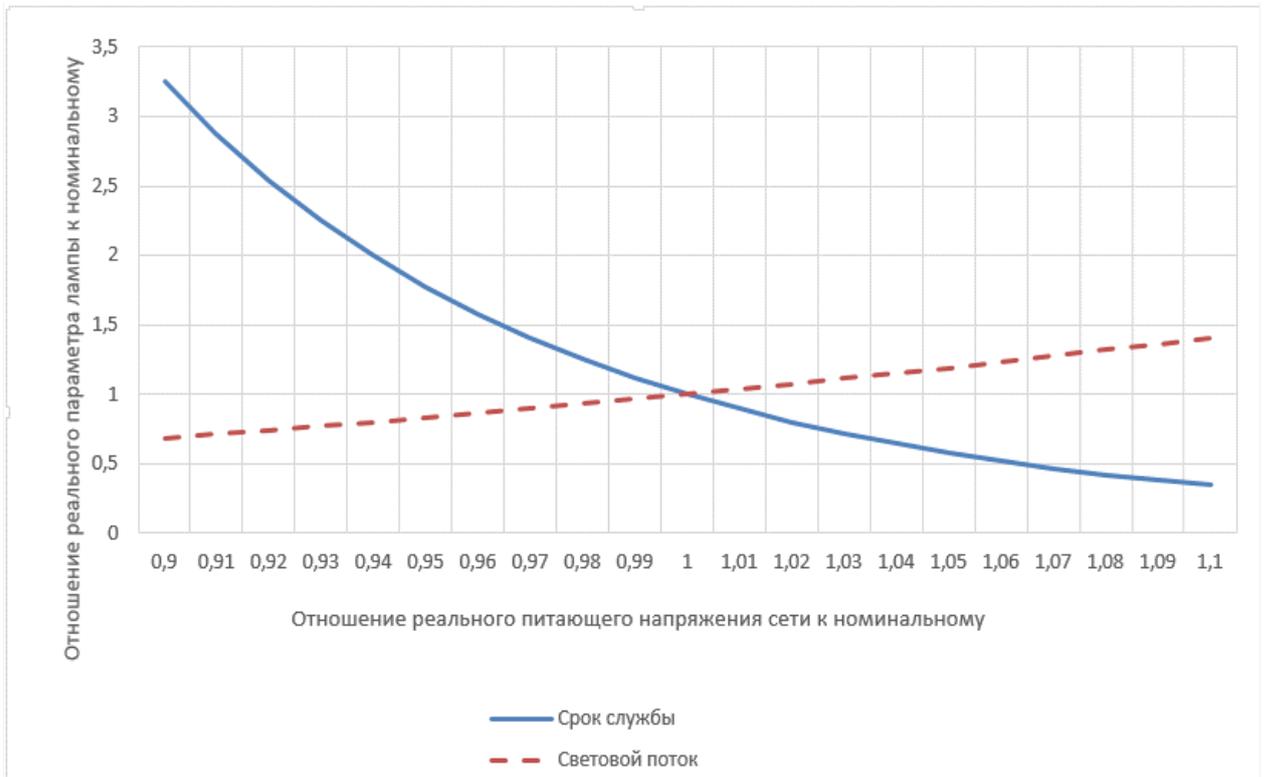


Рисунок 1.3 - Изменение светового потока и срока службы лампы в зависимости от питающего напряжения.

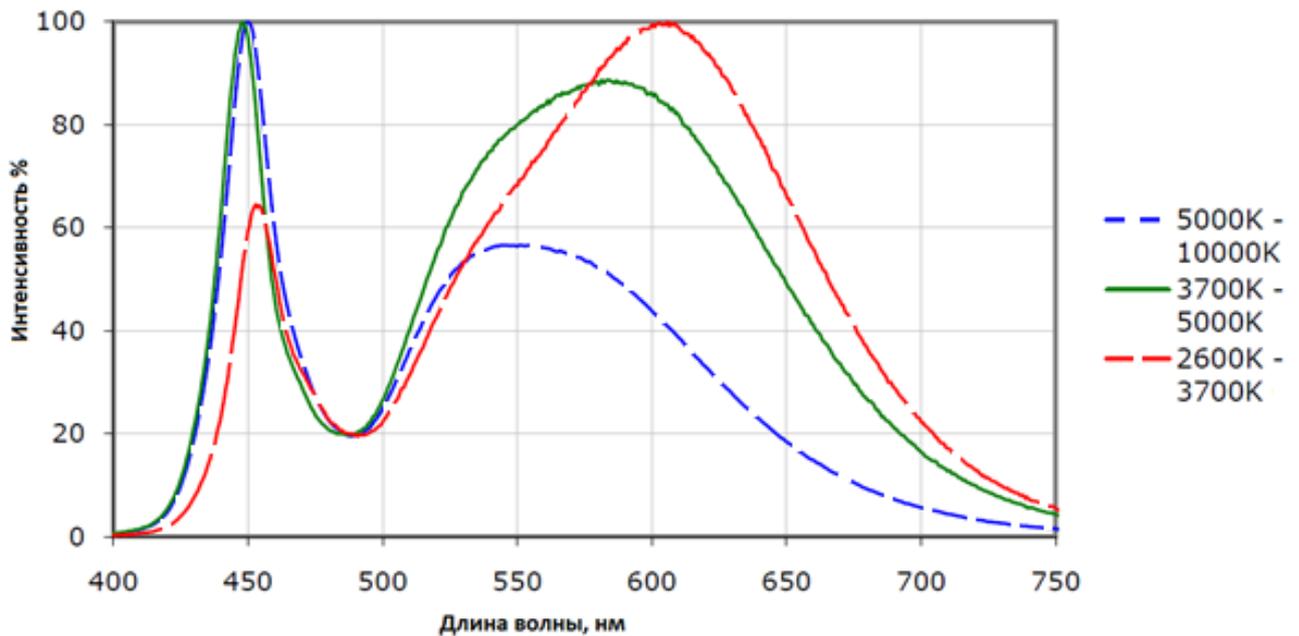


Рисунок 1.4 - Спектр светодиодов различной цветовой температуры на основе синего излучения кристалла [41]

На основе рисунка 1.4 можно сделать вывод о том, что спектр светодиодов имеет непрерывный характер и практически полностью находится в видимой для человеческого глаза области.

Световой поток светодиода зависит от силы тока, протекающего через него. Типичная зависимость представлена на рисунке 1.5 [41]. Для поддержания стабильного тока светодиодов в состав светодиодных изделий вводят электронные стабилизаторы. В отличие от стабилизаторов для Лампы накаливания, стабилизаторы для светодиодов характеризуются меньшей мощностью, отдаваемой в нагрузку. На основе рисунка 1.5 можно сделать вывод о том, что изменение протекающего через светодиоды тока в пределах  $\pm 10\%$  вызовут изменение светового потока менее чем на  $\pm 10\%$ , таким образом, стабилизаторы для светодиодов могут обладать меньшей прецизионностью чем стабилизаторы для лампы накаливания. Очевидно, что это упрощает их электрическую схему и повышает надежность оборудования.

Срок службы СИД достигает нескольких десятков тысяч часов, во время которых световой поток СИД постепенно уменьшается. Принято [42], что потеря 30% светового потока считается отказом СИД. Основная характеристика, отвечающая за продолжительность работы светодиода – температура полупроводникового кристалла: чем она выше в рабочем режиме прибора, тем быстрее уменьшается световой поток, и как следствие меньше служит весь прибор. Характерные зависимости среднего времени использования светодиода до уровня 0,7 приведены на рисунке 1.6 [43].

Таким образом, для обеспечения длительного срока службы светодиодных изделий необходимо эффективно отводить тепло от кристалла для этого необходимо правильно рассчитать потери в кристалле, т.к. не вся электрическая мощность светодиода преобразуется в видимый свет, а большой объем радиатора повышает себестоимость конечного изделия. Обычно производители мощных светодиодов указывают световой поток своей продукции с одного ватта подводимой мощности. Для того чтобы перевести световой поток в люменах в

ватты и рассчитать КПД преобразования необходимо использовать следующие выражения [44, 45].

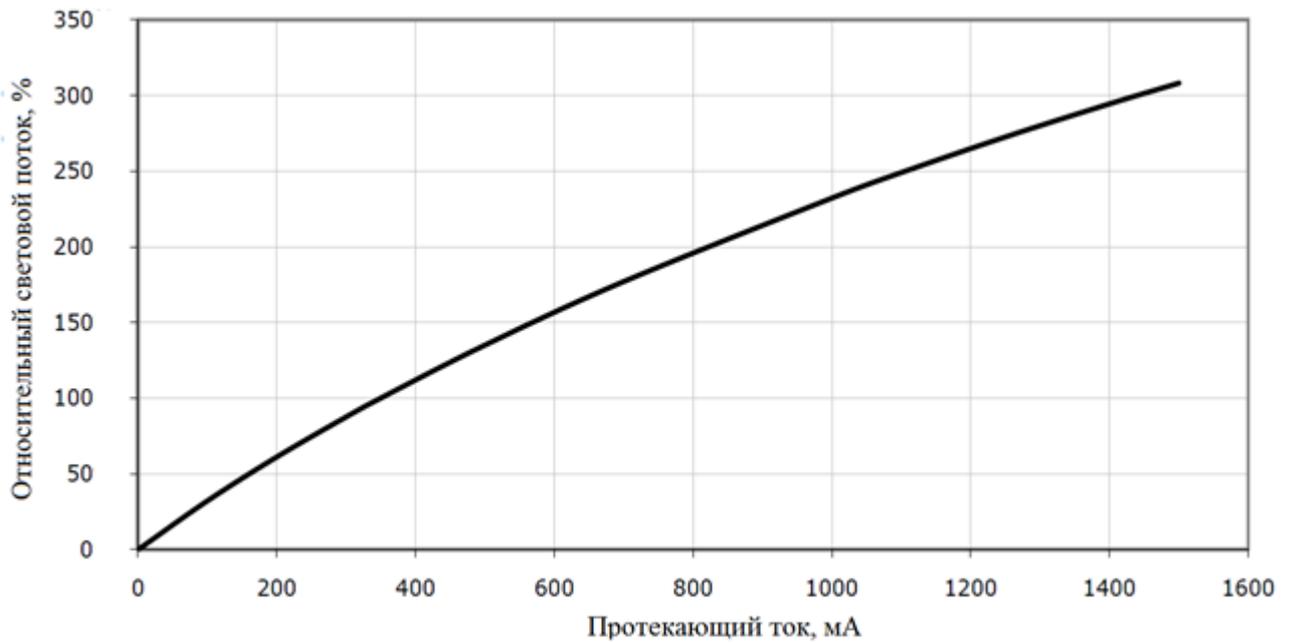


Рисунок 1.5 - Зависимость светового потока светодиода от величины силы тока через него [41]

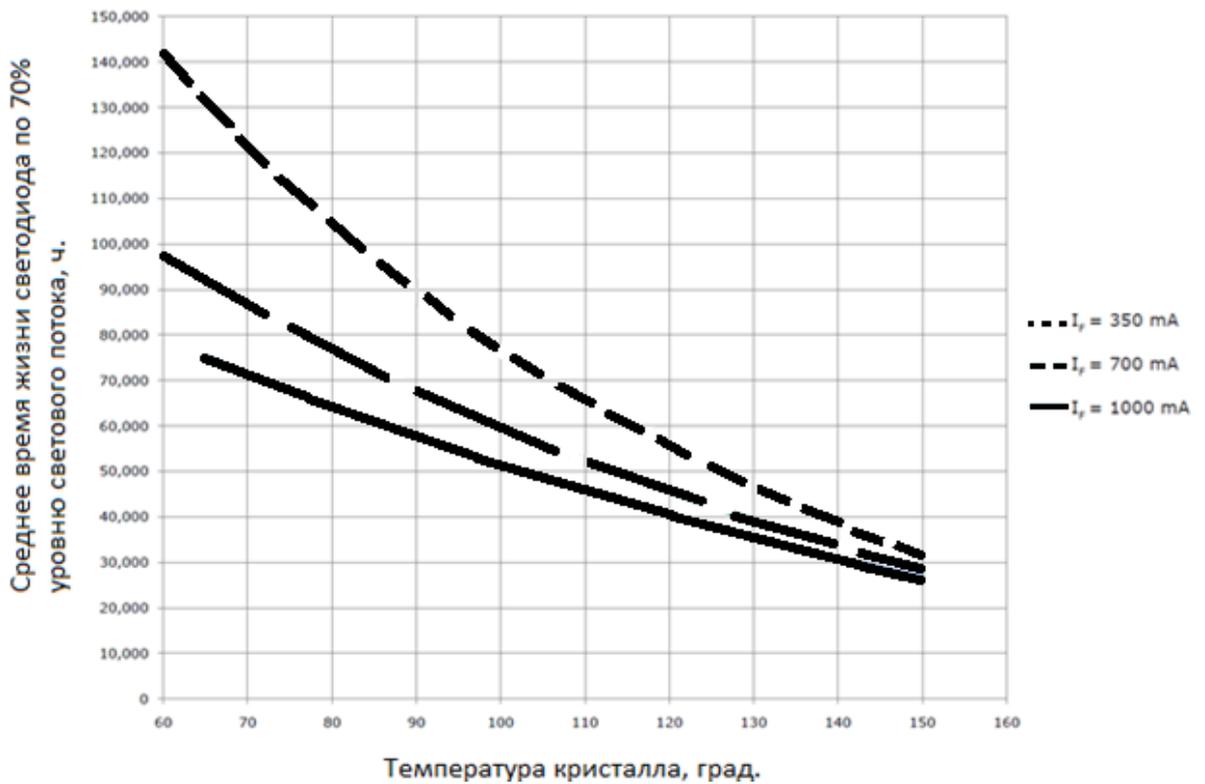


Рисунок 1.6 - Среднее время эффективного использования СИД

$$K = 683 \frac{\int_{780}^{360} E(\lambda) \times V(\lambda) d\lambda}{\int_{780}^{360} E(\lambda)}, \quad (1.3)$$

где  $K$  – световая эффективность излучения, Лм/Вт;  $\lambda$  – длина волны излучения, м;  $V(\lambda)$  – функция чувствительности глаза;  $E(\lambda)$  – нормализованная функция спектральной плотности,  $\text{м}^{-1}$ .

$$\Phi_p = \frac{\Phi}{P}, \quad (1.4)$$

где  $P$  – мощность, потребляемая СИД, Вт;  $\Phi$  – световой поток светодиода при электрической мощности, потребляемой СИД, Лм;

$\Phi_p$  – световой поток светодиода на ватт потребляемой мощности. КПД светодиода  $\eta$  можно вычислить следующим образом.

$$\eta = \frac{\Phi_p}{K} \quad (1.5)$$

При использовании данного расчета следует помнить, что от светодиода к светодиоду спектральная плотность и световой поток несколько изменяются, также эти параметры изменяются при нагреве кристалла в процессе работы. Однако, все необходимые данные обычно можно найти в техническом описании на светодиод.

Другим аспектом безопасности движения является обеспечение норм общего освещения кабины машиниста локомотивом [32-36, 46].

Для практической реализации норм освещенности могут быть использованы различные методы расчета.

Метод расчета освещенности по удельной мощности является наиболее простым. В соответствии с ним мощность ламп для освещения заданной площади освещаемого помещения находится из выражения:

$$P_{\text{уст}} = P_{\text{уд}} F, \quad (1.6)$$

где  $P_{уд}$  – удельная мощность на единицу площади, Вт/м<sup>2</sup>;  $F$  – площадь освещаемого помещения, м<sup>2</sup>.

Удельная мощность зависит от характеристики освещаемого помещения, типа и мощности ламп, типа светильников, высоты подвеса и размещения светильников.

Недостатком данного метода является невысокая точность определения характеристик освещенности.

Метод коэффициента использования предназначен для расчета общего освещения в закрытых помещениях при симметричном расположении светильников. Расчет освещения в помещении начинают с размещения светильников. При этом учитывают конфигурацию помещения и отражение света от стен и потолков.

Определяется расчетный световой поток одной лампы для обеспечения требуемой по нормам освещенности:

$$\Phi = \frac{E_n K_{зап} F z}{n \eta}, \quad (1.7)$$

где  $E_n$  – нормированная освещенность, Лк;  $F$  – площадь освещаемой поверхности, м<sup>2</sup>;  $K_{зап}$  – коэффициент запаса, учитывающий старение и запыленность источников света и арматуры, загрязнение стен и потолка;  $n$  – число светильников (как правило, намечается до расчета);  $z$  – коэффициент минимальной освещенности, равный

$$z = \frac{E_{ср}}{E_n}, \quad (1.8)$$

где  $E_{ср}$  – средняя освещенность, Лк;  $\eta$  – коэффициент использования светового потока источника света:

$$\eta = \frac{F}{h(L + B)}, \quad (1.9)$$

где,  $h$ ,  $L$ ,  $B$  – высота, длина, ширина помещения соответственно, м.

Недостатком метода является неточность выявления минимальной освещенности и мест ее проявления. Метод широко используется только для определения средней освещенности горизонтальных поверхностей.

Точечный метод расчета освещения применяется для расчета общего равномерного и локального освещения, местного освещения независимо от расположения освещаемой поверхности при светильниках прямого света. В соответствии с этим методом освещенность определяется в каждой точке рассчитываемой поверхности, относительно каждого источника освещения.

При расчете освещения горизонтальных и вертикальных поверхностей в общем случае пользуются монограммами Ратнера [47].

Освещенность  $E$  зависит от светораспределения светильников, расчетной высоты и расстояния проекции светильника на рабочую поверхность до контрольной точки [48].

Недостатком этого метода является необходимость выполнения большого количества однотипных расчетов по определению освещенности в различных точках освещаемой поверхности.

Наиболее рациональным для расчета освещенности является применение различных пакетов программ, в частности: Dialux, TracePro, моделирующих функционирование оптических систем. Для использования этих программ необходимо иметь точные светотехнические модели изделий, которые планируются применять, а также точно построенное место применения.

### **1.3 История развития и современное состояние атмосферной оптической связи.**

Вопросы повышения надежности функционирования остаются актуальными для устройств связи подвижного состава железной дороги. Необходимо передавать различного рода информацию на локомотив и с него, а также отслеживать загруженность линий.

В настоящее время способы передачи информации на железнодорожном транспорте разнообразны:

1. Использование рельсовой цепи.
2. Использование радиоканала.
3. Использование спутниковых систем.

Использование разных способов и их комбинаций для передачи информации предназначено для повышения надежности, а также достоверности передаваемой информации.

Основная причина при которой возникает необходимость иметь несколько резервируемых каналов для передачи информации – сложная электромагнитная обстановка, приносящая помехи в тракты передачи информации. Защитой от помех могут являться фильтры или помехоустойчивое кодирование (например, использование контрольной суммы).

Использование фильтров приводит к увеличению массогабаритных параметров изделий, использование помехоустойчивого кодирования приводит к уменьшению пропускной способности канала передачи данных.

В последние годы проводится внедрение альтернативного способа передачи данных: атмосферная оптическая линия связи (АОЛС) — вид связи, использующий оптический диапазон сигнала и передающий сигналы через атмосферу или вакуум. При этом предлагается использовать светодиоды или лазеры видимого или инфракрасного спектра. Применение оптического канала позволяет избегать сложностей, связанных с ЭМС окружающих приборы объектов.

Технология беспроводной передачи данных по радиоканалу на данный момент является очень распространённой технологией. Причиной этому служит то, что радиоволны распространяются в вакууме и в атмосфере; несмотря на то, что земная твердь и вода для них непрозрачны, благодаря эффектам дифракции и отражения, становится возможна связь между точками, не имеющими прямой видимости.

Передача осуществляется следующим образом: на передающей стороне формируются высокочастотные колебания (несущая частота). На несущую частоту

накладывается сигнал, который нужно передать — происходит модуляция полезным сигналом. Сформированный таким образом сигнал излучается антенной в пространство. На приёмной стороне он поступает в радиоприёмник, после чего система фильтров выделяет из множества наведенных в антенне токов от разных передатчиков сигнал с нужной несущей частотой, а детектор выделяет из него модулирующий полезный сигнал. Обычно, получаемый сигнал отличается от передаваемого сигнала передатчиком вследствие влияния внешней помехи.

Распространение радиоволн от источника к приёмнику может происходить несколькими путями одновременно. Вследствие этого и изменений параметров среды, возникают замирания — изменение уровня принимаемого сигнала во времени. Технология радиоканала имеет следующие недостатки.

По причине того, что сигнал радиоканала передается по всем направлениям, представляется возможным подключиться к сети и взломать ее [49].

Оптическая связь осуществляется путем передачи информации с помощью электромагнитных волн оптического диапазона. В 60-е годы XX века были созданы лазеры и появилась возможность построения широкополосных систем оптической связи [50 - 54].

Оптические системы связи делятся на открытые, где сигнал передается в атмосфере или вакууме, и закрытые использующие световоды.

Основная причина востребованности этой технологии заключается в огромном потенциале передавать большие объемы данных на высоких скоростях в инфракрасном диапазоне длин волн [55].

АОЛС начало бурно развиваться после изобретения газового лазера в 1960 году. Первая экспериментальная АОЛС в Москве длиной 4,5 км была построена силами ЦНИИС МС СССР в 1965 году между АТС МГУ и АТС на Зубовской площади. В течение 6 лет было построено ещё пять АОЛС в Красногорске (17,5 км), Москве (4,5 км), Ереване (28км), Куйбышеве (5 км), Клайпеде (1,6 км) [56, 57].

Результаты опытной эксплуатации АОЛС в течение 3-х лет показали, что коэффициент готовности АОЛС составлял от 0,72-0,73 (28 км) до 0,96-0,97 (1,6 км). Основной причиной отказов были туманы и снегопады.

Таким образом, чем большее время простоев допускается, тем более протяженную АОЛС можно проектировать.

АОЛС двух объектов осуществляется посредством соединения типа «точка-точка». Технология основывается на передаче данных модулированным излучением.

Системы АОЛС работают в двух диапазонах длин волн, что связано с окнами прозрачности атмосферы: 780 - 850 нм и 1520 - 1600 нм. Обычно, системы АОЛС с длиной волны 1520 - 1600 нм используются для передачи данных с более высокой мощностью и на большие расстояния [55, 58].

Преимущества открытого оптического канала:

- 1) Оборудование FSO работает в диапазоне 400 ТГц, а значит, не требует лицензирования и процедуры выделения частот,
- 2) беспроводные оптические системы не создают взаимных помех и не чувствительны к электромагнитному шуму,
- 3) для повышения безопасности радиочастотных сетей обычно применяют кодирование и различные средства защиты передаваемой информации, что уменьшает скорость передачи полезных данных. В открытой оптической линии защита обеспечивается за счет узкой диаграммы направленности излучения. Для перехвата информации необходимо установить приемник непосредственно в пучок света. [59]

На основе работ [60-62] можно сделать вывод о том, что основным недостатком АОЛС является зависимость пропускания атмосферой оптического излучения от погоды.

Распространение лазерного излучения в атмосфере сопровождается следующими тремя существенными процессами.

- 1) флуктуациями принимаемого сигнала вследствие рефракции излучения на турбулентных неоднородностях показателя преломления воздуха;
- 2) рассеянием излучения на аэрозолях,
- 3) экранирование излучения механическими предметами.

Самым простым способом уменьшения влияния турбулентной рефракции на качество канала связи, которым пользуются разработчики, является увеличение размера приемной оптической антенны.

Помимо молекулярного поглощения распространению луча мешает молекулярное рассеяние лучистой энергии микросгустками молекул воздуха, обладающих различной плотностью и разными показателями преломления. Эти неоднородности в газовой среде весьма нестабильны и зависят от местных температурных условий, времени года и суток, а также от содержания примесей в каждой конкретной микроне атмосферы. Молекулярное рассеяние достаточно хорошо изучено. Составлены обширные таблицы коэффициентов рассеяния в видимой и инфракрасной областях спектра, обеспечивающие достаточно точный количественный расчет потерь энергии излучения на заданном расстоянии [63 - 65]. Этот тип рассеяния не оказывает существенного вреда АОЛС в отличие от аэрозольного рассеяния, которое будет рассмотрено ниже.

Атмосфера представляет собой механическую смесь из газов, паров, капель жидкости и твердых частиц. В ней всегда в переменном количестве присутствуют пыль, дым, кристаллики льда. Поэтому атмосфера является аэрозолем, состав которого непрерывно изменяется из-за перемешивания.

Все типы атмосферных аэрозолей можно объединить в следующие основные классы: облака, туманы, дымки, морозь и осадки - дождь или снег. В облаках и туманах наиболее вероятное значение радиуса частиц составляет 5-6 мкм, а в дымках на 1-2 порядка меньше. Поэтому ослабление микронного излучения в дымках ниже. Результаты измерений прозрачности дымок, туманов и осадков в различных климатических районах изложены в [63-65].

Вследствие сложной структуры аэрозолей в реальной атмосфере расчет потерь излучения затруднен. На практике используют интегральную характеристику – метеорологическую дальность видимости ( $S_m$ ).

Сильный ливень (уровень осадков 75 мм/час) не мешает лазерной системе передавать данные на расстояния до 1.5 км и со скоростью до 1 Гбит/с, в то время как в каналах связи на основе РЛС скорость передачи может упасть до нескольких

мегабит в секунду. Туманы способны полностью прерывать работу беспроводных оптических систем [54].

Опыт эксплуатации АОЛС показал, что дожди, дымки и снег средней интенсивности мало влияют на работоспособность линий связи, обладающих достаточным динамическим потенциалом. Основной причиной нарушения работоспособности последних являются туманы. Кроме того, ухудшение видимости менее 1000 метров при метелях, снегопадах, дождях и моросях имеет повторяемость не более 5-10%, остальные 90-95% приходятся на туманы. Вероятность образования тумана, его характер, интенсивность и продолжительность существенно зависят от широты места, географических особенностей, сезона года, характера атмосферных процессов. Из практики известно, что в одних случаях туман сплошь застилает значительную территорию, в других - возникает местами, то есть имеет большую пространственно-временную изменчивость. Наличие в непосредственной близости от АОЛС водоема также может повлиять на количество возникающих туманов, а значит, и на доступность линии [64].

Расчеты надежности работы АОЛС с учетом измеренных средних значений МДВ и вероятностного распределения МДВ по месяцам для Москвы и Одессы приведены в [65].

Корректировка пучка света применяется для обеспечения бесперебойной работы АОЛС. Приемник очень восприимчив к перемещению или смещению пучка света, которые могут быть вызваны внешними факторами, например, ветром, изменений температуры, и т.п. Отклонения могут быть учтены при помощи двух видов решений:

- а) используется узкий, сфокусированный пучок света с автоматической корректировкой смещения,
- б) используется широкий пучок света без корректировки.

Системы с автоматической корректировкой в состоянии устранять смещение, до того, как нежелательное смещение приведет к нарушению передачи. Широкий пучок увеличивает зону приема. Однако серьезным недостатком является то, что

более широкий пучок в большей степени подвержен затуханию и поэтому более восприимчив к погодным условиям [66].

Преграды в пределах прямой видимости могут уменьшать скорость передачи данных. Временные преграды, например, птицы, обычно не являются причиной прерывания передачи. Если большой объект временно полностью преградит путь лучу, передача данных будет временно прервана, однако, эта проблема может решена с помощью повторной передачи [66].

Среди производителей лазерных АОЛС систем можно отметить: Molex, PAV Data Systems Ltd, НПК Катарсис.

Системы FSO CANOBEAM компании MOLEX имеют функцию автоматической корректировки пучка в реальном времени, что позволяет учитывать отклонения системы при воздействии внешних факторов. Передача данных осуществляется на расстояние до 2 км со скоростью от 25 Мб/с до 1.25 Гб/с (от 100 м до 1 км) [66, 67].

Компания НПК «Катарсис» производит линейку приемопередатчиков БОКС. Базовое изделие семейства — БОКС-10М, состоит из двух одинаковых приемопередатчиков, устанавливаемых на обеих сторонах канала связи. Каждый блок состоит из приемопередающего модуля, козырька, интерфейсного кабеля (длиной 5 метров), системы наведения, кронштейна, блока питания и блока доступа.

## **1.4 Выводы по обзору литературы**

1. СИД, как источник света, развивались в течении второй половины 20-го века, и на сегодняшний момент применяются во многих светотехнических

приборах, в том числе опытные партии светодиодных изделий представлены на железной дороге.

2. Принципиальное отличие в физике работы СИД от ЛН определяет иной подход к разработке оборудования на их основе.

3. Для продолжительной работы светодиода при разработке необходимо обеспечить соответствующий тепловой режим работы.

4. В настоящее время используется множество способов расчета и моделирования оптических элементов и систем в целом, особое внимание отдается компьютерным способам расчета.

5. Для надёжной работы АОЛС необходимо точное наведение источника на приемник и учет их возможных взаимных отклонений.

6. АОЛС имеет широкие перспективы внедрения на железной дороге по причине высокой стойкости сигнала к промышленным помехам и высокой защищенности линии связи от перехвата.

## **Глава 2. Использование светодиодов в устройствах общего освещения кабин машиниста локомотива**

### **2.1. Оптимизация системы общего освещения кабины машиниста устройствами на основе светодиодов**

В современных локомотивах железнодорожного транспорта в последнее время в источниках света используются светодиодные модули, обеспечивающие по сравнению с лампами накаливания значительно больший срок службы [4] и меньшее потребление электрической энергии [68, 69].

Для вновь разрабатываемых и капитально восстановленных локомотивов требуется разработать проект освещения, при котором имеет место выполнение норм безопасности по освещенности кабины машиниста [32-35]. В Таблице 2.1 приведены численные значения указанных норм, которые анализируются в данной главе.

Для практической реализации норм освещенности, приведенных в таблице 2.1, могут быть использованы различные методы расчета.

В современных локомотивах в качестве источников освещения кабины используются светодиодные светильники [70]. Однако, использование светодиодов в традиционных светильниках с прозрачным рассеивателем недопустимо: светодиод имеет высокую яркость, и случайный взгляд машиниста на светильник может вызвать локальное временное нарушение зрения, что отразится на безопасности движения локомотива. Для уменьшения яркости светодиодов плафон светильника должен обладать высокими светорассеивающими свойствами. Это определяет принципиально новую конструкцию светильника:

вместо точечного источника излучения (ЛН) применяются светильники распределенного типа.

Таблица 2.1 – Нормы внутреннего освещения кабины машиниста

Режим работы локомотива	Освещенность на пульте управления, Лк
«яркий свет»	От 20 до 60
«тусклый свет»	От 2 до 9
Неравномерность освещенности (отношение максимальной освещенности к минимальной), не более	2:1
Зеркальное отражение в стеклах окон кабины машиниста приборов, ламп подсветки приборов, светильников общего, аварийного и местного освещения.	отсутствие

При разработках и дальнейших исследованиях будем считать, что:

- 1) выполняются условия норм: «Лобовые окна должны обеспечивать ... хороший обзор, без искажения цветов сигналов светофоров.» [71];
- 2) из соображений обеспечения максимальной надежности светотехнического проекта количество светильников должно быть больше одного, и каждый должен иметь независимую систему управления;
- 3) из соображений экономической целесообразности светильники должны быть равнозначными, их количество должно быть минимальным, а размер относительно не большим;
- 4) из соображений эргономики светильники должны быть встраиваемыми в потолок и не выступать за его габариты.

Оптимальным положением светильника общего освещения можно считать положение на потолке непосредственно над головой машиниста. Если двигать

светильники в сторону окна, то повышается вероятность случайного взгляда на светильник, что может вызывать дискомфорт также, обычно около окна на потолке имеется антресоль со вспомогательным оборудованием, доступ к которой станет ограничен. Если двигать светильники от окна, то во время работы на пульте управления появится тень от тела машиниста, что вызовет повышенную неравномерность освещения, а значит большую утомляемость, кроме того, удельная мощность светильника в этом случае потребуется больше. Также форму рассеивателя светильника следует выбирать из простых форм: прямоугольник, квадрат, круг, овал, т.к. более сложные формы обладают большей себестоимостью и сложностью в производстве.

На рисунке 2.1 приведен вид сверху на рабочее место машиниста [72].

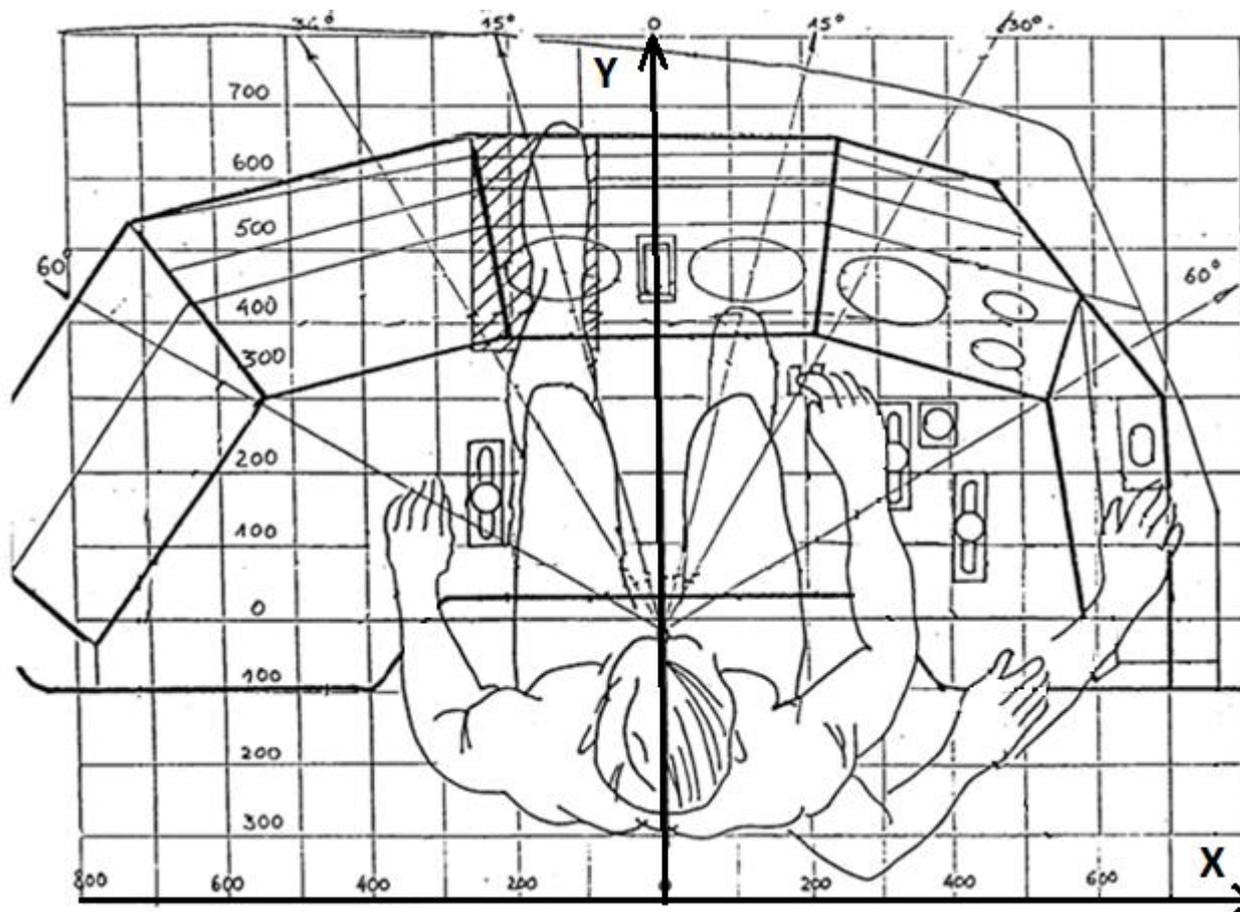


Рисунок 2.1 - Вид сверху на рабочее место машиниста [72]

Принципы конструирования пульта управления следующие: панель управления пульта должна быть наклонена по направлению к оператору (машинисту) под углом от 6 до 10° от горизонтальной плоскости, а панель

информации - в направлении от оператора (машиниста) под углом от 20 до 40° к вертикальной плоскости [71, 72] (см. рисунок 2.2).

Измерение уровней освещенности и ее неравномерность проводится по пяти точкам на панели управления и панели информации (см. рисунок 2.3).

Следует отметить, что равномерность освещения имеет существенное гигиеническое значение. При резкой разнице в уровне освещенности рабочего места в случаях перевода взгляда со светлого на темный участок и наоборот глазу приходится каждый раз приспособляться к новым условиям освещенности (адаптироваться). Так как адаптация как в ту, так и в другую сторону происходит постепенно, то при переводе взгляда с темного на светлый участок и наоборот работоспособность глаза машиниста будет снижена, что скажется на безопасности движения локомотива.

Исходя из вышесказанного, основная задача светотехнического проекта освещения кабины машиниста локомотива – создание освещения с минимальной неравномерностью на пульте управления, не более 2 к 1 согласно требованиям безопасности.

Учитывая малое расстояние от объекта освещения до светильников и то, что плафон светильника обладает высокими светорассеивающими свойствами, расчет необходимо вести согласно методике точечного расчета освещенности от равномерно яркого светящегося объекта [8, 47, 73 - 75]:

$$dE = \frac{dI_0 \cos^n \alpha \cos \beta}{L^2}, \quad (2.1)$$

где  $I_0$  – осевая сила света, Кд;  $\alpha$  – угол между направлением силы света к точке и осью симметрии, градус;  $\beta$  – угол между направлением света в точку и нормалью к элементу  $ds$ , градус;  $L$  – расстояние от светящейся площадки до расчетной точки, м;  $n$  – показатель степени, отражающий форму кривой силы света.



Рисунок 2.2 - Продольный разрез пульта управления

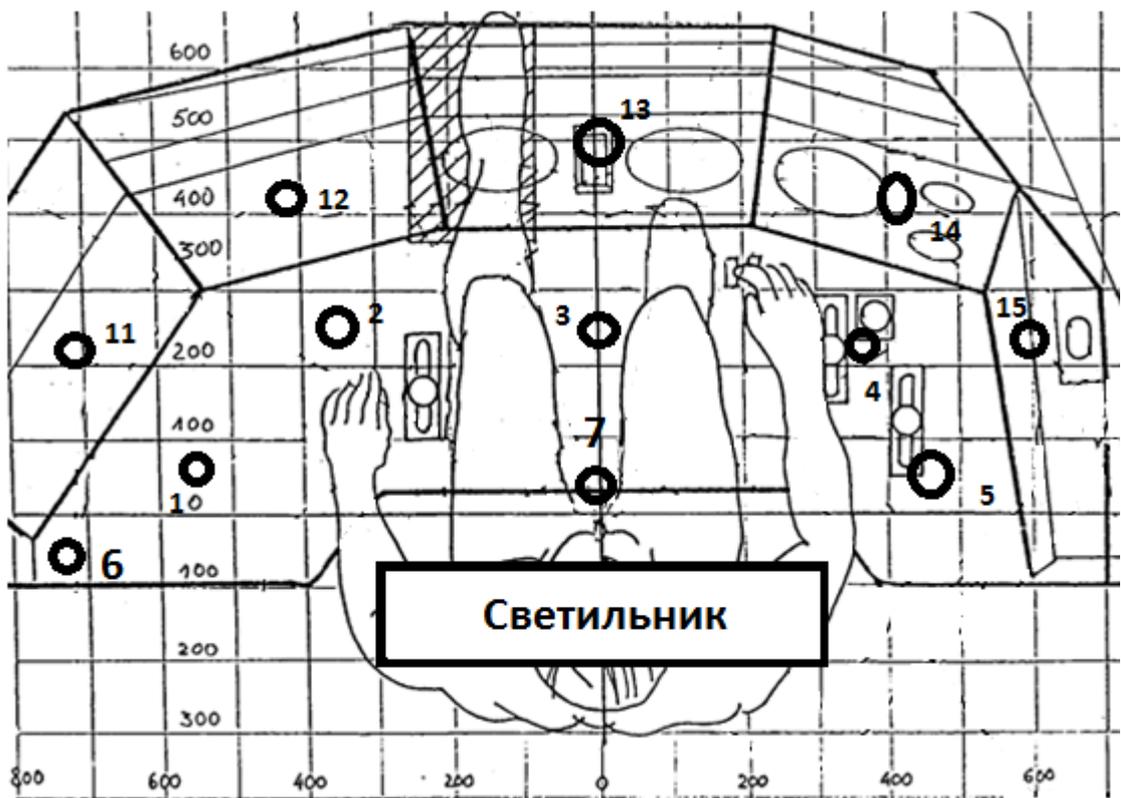


Рисунок 2.3 - Расположение светильника и точек измерения

$$dE = \frac{dI_0 \cos^n \alpha \cos \beta}{L^2}, \quad (2.1)$$

где  $I_0$  – осевая сила света, Кд;  $\alpha$  – угол между направлением силы света к точке и осью симметрии, градус;  $\beta$  – угол между направлением света в точку и нормалью к элементу  $ds$ , градус;  $L$  – расстояние от светящейся площадки до расчетной точки, м;  $n$  – показатель степени, отражающий форму кривой силы света

Свет от равнояркой поверхности распространяется по закону косинуса [40], в соответствии с чем:  $n = 1$ .

Допустим, что кабина машиниста расположена в ортогональной системе координат, центром системы будет точка (0.0) указанная на рисунке 2.3.

Используя это допущение, можно выразить переменные, использованные в (2.1) через расстояние от светящегося элемента светильника до освещаемой точки.

$$\cos \beta = \frac{h \cos \Theta + \sqrt{x^2 + y^2} \sin \Theta}{\sqrt{y^2 + x^2 + h^2}} \quad (2.2)$$

$$\cos \alpha = \frac{h}{\sqrt{y^2 + x^2 + h^2}} \quad (2.3)$$

$$L = \sqrt{y^2 + x^2 + h^2}, \quad (2.4)$$

где  $h$  – высота светильника, относительно точки освещения, м,  $\Theta$  – угол наклона расчетной плоскости по отношению к горизонтальной плоскости, градус;  $x$ ,  $y$  – расстояние от светящегося элемента светильника до точки измерения, м.

Так как поверхность равнояркая:

$$dI_0 = L_0 ds, \quad (2.5)$$

где  $L_0$  – габаритная яркость светильника, Кд/м<sup>2</sup>,  $s$  – площадь светильника, м<sup>2</sup>;

то учетом выражений (2.2) - (2.5) уравнение (2.1) примет вид

$$E = hL_0 \int_s \frac{(h \cos \Theta + \sqrt{x^2 + y^2} \sin \Theta) ds}{(y^2 + x^2 + h^2)^2} \quad (2.6)$$

Для его решения раскроем поверхностный интеграл по формуле:

$$\int_s F(m) ds = \int_D F[x, y, g(x, y)] \sqrt{1 + g'_x{}^2 + g'_y{}^2} dx dy =$$

$$= \int_D F[x, y, g(x, y)] dx dy, \quad (2.7)$$

где  $D$  – область плоскости  $OXY$  ограниченная уравнением  $z = g(x, y)$

Тогда выражение (2.6) примет вид.

$$E = L_0 h \int_D \frac{(h \cos \Theta + \sqrt{x^2 + y^2} \sin \Theta) dx dy}{(y^2 + x^2 + h^2)^2} \quad (2.8)$$

Для упрощения расчетов предлагается светильники представить в виде массива независимых светотехнических элементов в виде квадрата с площадью  $S$  см<sup>2</sup>, при этом интеграл (2.8) заменится линейной суммой.

$$E = L_0 S h \sum_{i,j} \frac{(h \cos \Theta + \sqrt{x_i^2 + y_j^2} \sin \Theta)}{(x_i^2 + y_j^2 + h^2)^2}, \quad (2.9)$$

где  $i, j$  – порядковый номер соответствующей координаты светящегося элемента;  $S$  – площадь светящегося элемента, м<sup>2</sup>.

В общем случае, форма пульта управления может различаться, в зависимости от типа кабины она может быть трапециевидальной или L-образной. Также может различаться взаимное положение пульта машиниста и пульта помощника машиниста, которое зависит от типа кабины и ее размера. Таким образом, оптимизация проекта освещения должна производиться под каждую кабину машиниста отдельно.

Рассмотрим случай освещения только одного пульта управления выполненного в виде трапеции (см. рисунок 2.3). При проведении сертификационных испытаний испытатель измеряет освещенность 5-ти (точки 1-5) равномерно распределенных точек горизонтальной рабочей поверхности и 5-ти (точки 11-15) точек вертикальной рабочей поверхности (см. рисунок 2.3). При этом неравномерность освещенности оценивается отдельно для вертикальной и горизонтальной рабочей поверхности. Также рассмотрим точки 6 и 7 как пример предельного отношения неравномерности освещения на рабочей поверхности.

Для дальнейшего анализа примем следующие допущения:

1) один светильник освещает один пульт, а влияние светильника на второй пульт незначительно. Это применимо для расчетов кабины с разнесенными пультами (см. рисунок 2.4), для совмещенного пульта управления (см. рисунок 2.5) при расчете необходимо учитывать взаимное влияние светильников;

2) светильник представляет собой равнояркую поверхность простой формы (допустим, квадрат или прямоугольник, т.к. эти формы наиболее просто и дешево изготовить);

3) отражение от стен не учитываем по причине того, что на большей части стены находится окно, на которое, согласно геометрическим построениям, будет попадать незначительная часть светового потока светильников;

4) Ось симметрии светильника совпадает с осью симметрии пульта, а проекция центра светильника совпадает с центром головы машиниста (см рисунок 2.3).

Произведя серию расчетов для различных габаритов светильников (ДхШ в мм): 100х150, 150х150, 150х300, 150х800, согласно выражению (2,9), можно сделать вывод о том, что неравномерность освещенности поверхности точек 1-5 и 11-15 при перечисленных выше условиях находится в пределах 1,1-1,4. При этом неравномерность освещения крайних точек 6 и 7 находится в пределах 1,35 (случай 150х800) -1,68 (случай 150х150), случае 100х150 расчет показал неравномерность 1,45.

Результаты исследований позволяют сделать вывод о том, что при общем освещении кабины машиниста, основанном на равноярком светильнике, размеры светильника можно делать малыми по сравнению с размерами рабочего места, что позволяет удешевить конструкцию светильника при должном уровне обеспечения норм безопасности. Однако, значительное уменьшение размеров увеличивает габаритную яркость светильника, случайный взгляд на который может вызвать временный дискомфорт машиниста. Габаритная яркость определяется световым потоком от светильника, который в свою очередь зависит от конкретной конструкции кабины машиниста.

Моделирование освещенности в системе Dialux подтвердило корректность полученных уравнений и достоверность выполненных расчетов. Результаты моделирования приведены на рисунках 2.6 и 2.7.

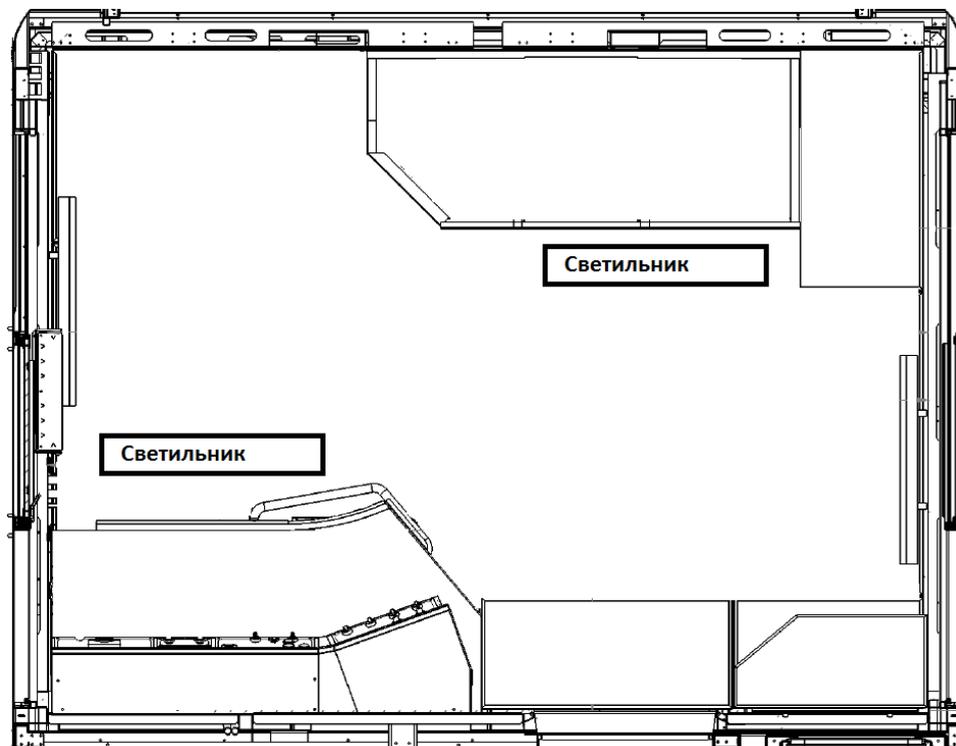


Рисунок 2.4 - Схематическая расстановка пультов управления и светильников общего освещения в кабине ТЭ8



Рисунок 2.5 - Пульт управления 2ЭС10

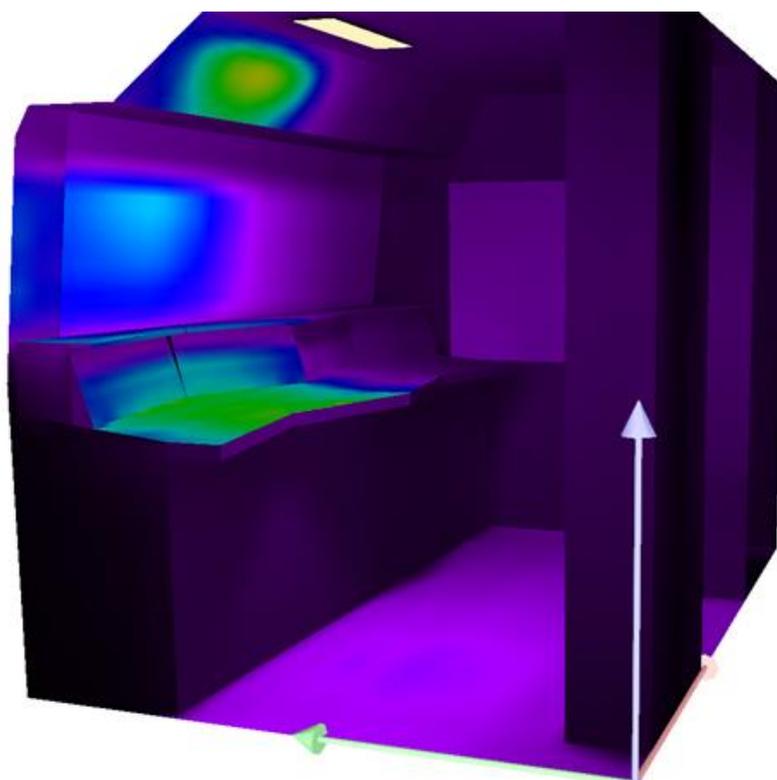


Рисунок 2.6 - Моделирование светильника с габаритами 600x150 мм

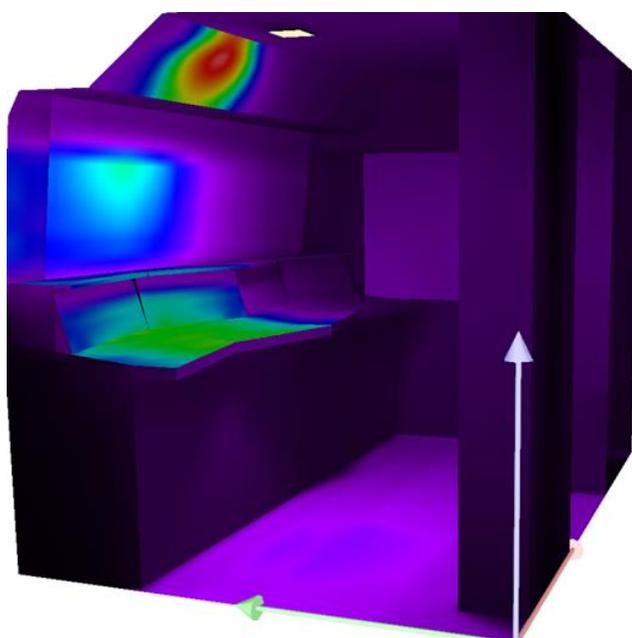


Рисунок 2.7 - Моделирование светильника с габаритами 150x150 мм

## **2.2. Анализ системы общего освещения кабины машиниста локомотива на примере маневрового тепловоза**

Особенностью маневровых локомотивов с кузовом капотного типа является возможность обеспечения кругового обзора (360 градусов) для машиниста при выполнении станционных работ по формированию поездных единиц. В полной мере этим свойством обладает новый локомотив ТЭМ9Н (см. рисунок 2.8). Другой особенностью локомотива ТЭМ9Н является использование в качестве источников освещения кабины светодиодных светильников. Светодиодный светильник можно представить в виде равнояркой поверхности конечных размеров. Это создает определенные трудности расположения светильников в кабине машиниста локомотива с точки зрения ликвидации отражений в обзорных стеклах.

При выполнении работы машинист маневрового локомотива может сидеть в кресле или, если это необходимо, осуществлять движение стоя.

Наличие и отсутствие отражений связано с положением глаз машиниста относительно лобового стекла. Отражения формируются из лучей света от светильника, падающих под таким углом на лобовое стекло, что, отражаясь, они попадают в глаза машиниста, что негативно скажется на безопасности движения.

Наличие широкого лобового окна в тепловозах ТЭМ9Н является одной из причин появления отражений (см. рисунок 2.9): в иных конструкциях тепловозов с кузовом капотного типа отражение заднего светильника не появляется – на месте стекла в ранее разработанных локомотивах находится обшивка.

При проектировании тепловоза принята конструкция с плоскими стеклами, которые устанавливаются перпендикулярно полу. Причиной данного выбора послужила необходимость выполнить конструктивный размер 1-ВМ [76].



Рисунок 2.8 - Внешний вид тепловоза ТЭМ9Н



Рисунок 2.9 - Отражение от светильников в лобовом стекле при положении машинистов стоя

Для того чтобы понять наличие отражений в лобовом окне от светильника необходимо понять наихудший случай положения машиниста. В первом приближении достаточно воспользоваться законом отражения света и плоским чертежом кабины машиниста.

Рабочим положением машиниста считается нахождение его в кресле (сидит) или перед креслом (стоит). Рассмотрим эти положения: 1 – высокий, машинист стоит, 2 – низкий, машинист сидит. Размеры машиниста взяты согласно нормам на проектирование кабин и оборудования моторвагонного подвижного состава железнодорожного транспорта.

На рисунке 2.10 приведен разрез кабины машиниста, для двух вышеописанных случаев положения машиниста. Видно, что в положении 2 машинист способен увидеть большую часть потолка, нежели в положении 1.

На рисунке 2.11 видно, что произойдет при отклонении стекла (положительный наклон) на 15 градусов, возможность попадания отражений от потолочных светильников в глаза машиниста должна отсутствовать.

Стекла можно придать отрицательный наклон. В данном случае худшим будет случай 1, когда высокий машинист стоит. Согласно построениям, такое решение менее эффективно и при 15 градусах машинист видит большую часть потолка и выбор места установки светильников остается сложным.

Таким образом, техническое решение в виде стекол кабины установленных перпендикулярно полу, обусловленное необходимостью выполнить требования габарита кабины машиниста, послужило нарушением условия нормы: «Лобовые окна должны обеспечивать локомотивной бригаде в дневное и ночное время и при всех погодных условиях хороший обзор, без искажения цветов сигналов светофоров. Угол их установки должен подбираться с учетом исключения отражения в них наружных световых сигналов и внутренних источников света» [71].

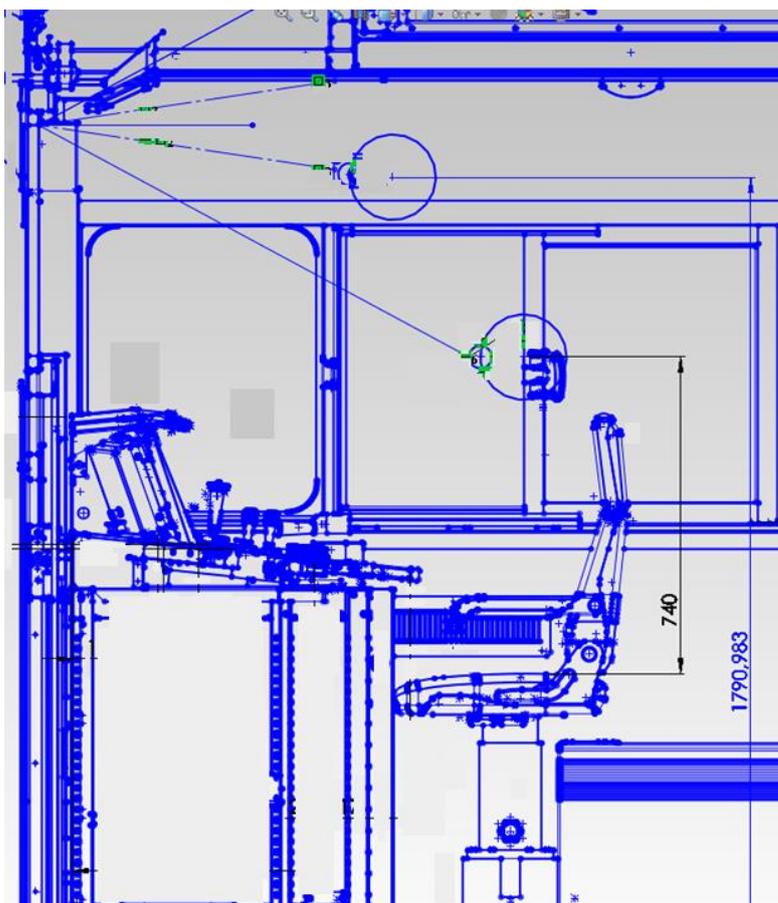


Рисунок 2.10 - Наихудшее рабочее положение машиниста, где отражение от стекла позволяет видеть весь потолок кабины

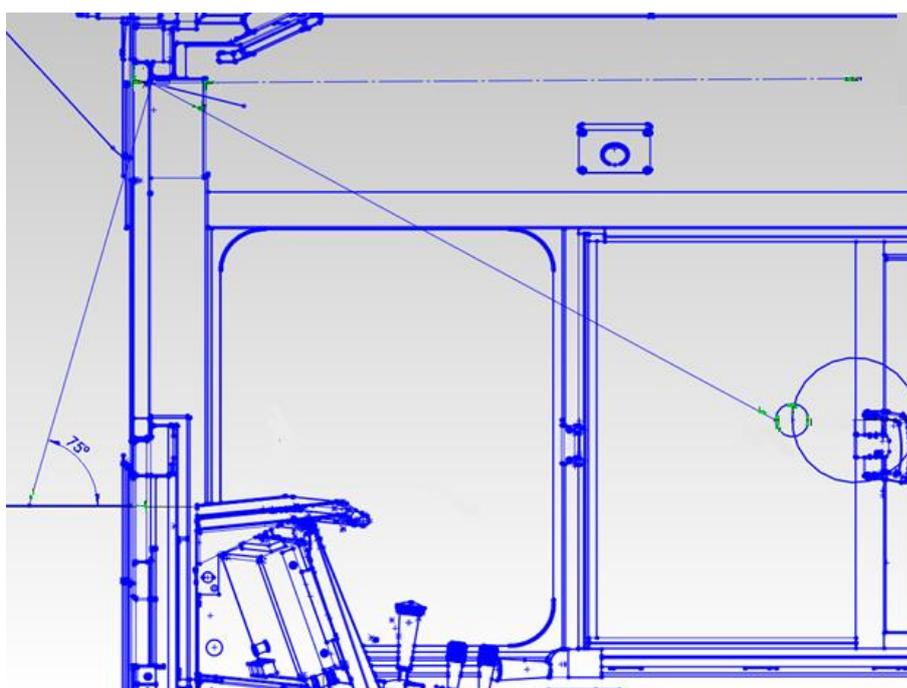


Рисунок 2.11 - Введение положительного наклона в 15 градусов

Для того чтобы исключить попадание светильника в пределы видимости машиниста необходимо вывести из зоны видимости машиниста источники света и источники отраженного света, определяемые частями корпуса светильника, на которые попадает его свет.

Для решения данной технической задачи разработан корпус светильника специальной формы (см. рисунок 2.12) [77].

Выходное окно светильника выполнено из прозрачного материала для того, чтобы не сформировать собственное световое тело, непрозрачное обрамление вокруг выходного окна дополнительно сужает световой поток светодиодных элементов, установленных внутри светильника на основание защитного корпуса.

Светильник крепится на потолок кабины машиниста и излучает направленный световой поток непосредственно на пульт управления локомотивом. Угол установки зеркальных отражателей рассчитан таким образом, что при взгляде машиниста стандартного роста на лобовое стекло кабины управления из рабочего положения отражения от светового потока светильника или элементов корпуса светильника в окне не появится.

Особенность конструкции светильника заключается в том, что корпус светильника скрывает источник света и ограничивает угол распространения света от источника, кроме того введены зеркальные наклейки вокруг светящейся поверхности светильника.

Геометрический расчет кабины со светильником показал, что (см. рисунок 2.13) отражение света, от стекла попадая на зеркальную поверхность, отражается не в активную поверхность светильника, а в пол. Таким образом, отражения светильника в окне пропадают.

Натурные испытания, проведенные на тепловозе, подтвердили корректность данных предложенного решения.

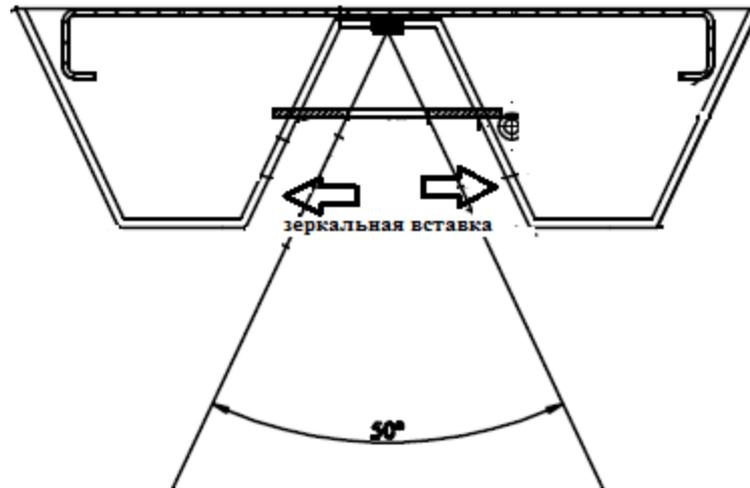


Рисунок 2.12 - Конструкция светильника

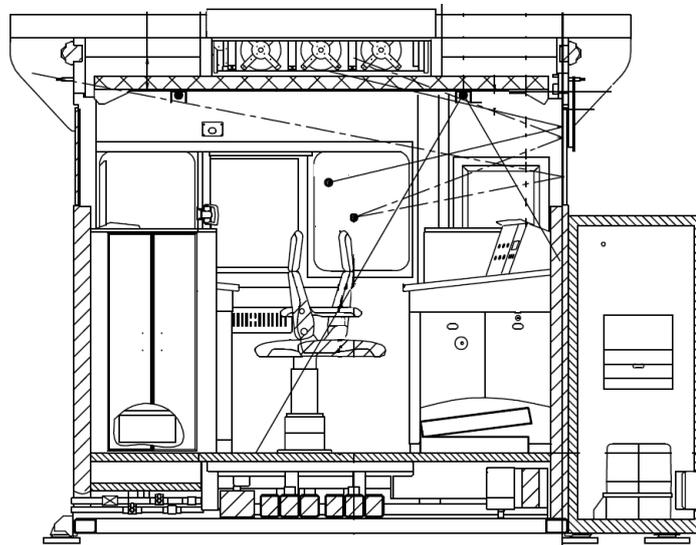


Рисунок 2.13 - Геометрическое моделирование наличия отражений при разработанной конструкции светильника

### 2.3. Анализ применения изменения спектра излучения освещения кабины машиниста

Известно, что человеческий глаз способен воспринимать излучение различными способами: зрительно через колбочки и палочки, незрительно или

биологически через меланопсин содержащие клетки сетчатки, сигналы от которых поступают в эпифиз – орган, регулирующий выработку мелатонина [78]. Чередование циклов света и темноты вызывают циклическую секрецию мелатонина и кортизола [79]. Известны исследования, показывающие, что нарушения естественных колебаний содержания мелатонина в крови существенно влияют на биологическое состояние человека [80]. Спектр биологического действия (спектр подавления мелатонина) имеет максимум в районе 460нм, что рядом с максимумом синего излучения для большинства современных светодиодов [81]. Современные исследования показывают, что подавление мелатонина увеличивается по мере роста коррелированной цветовой температуры излучателя, и светодиоды теплого спектра оказывают влияние на подавление мелатонина не больше, чем лампы накаливания [79, 81].

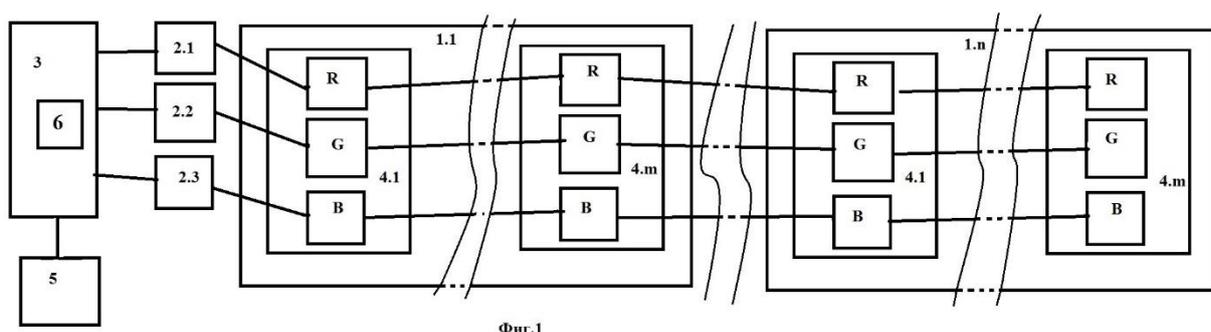
С другой стороны, доказано, что увеличение доли синего света в освещении повышает бдительность за счет подавления мелатонина [82]. Использование стандартных светильников на основе ламп накаливания или светодиодов обычно имеет определенную не меняющуюся цветовую температуру. Возможно применение в системе общего освещения RGB-диодов, или светодиодов с различной коррелированной цветовой температурой. Вводится система управления долей тока через различные группы кристаллов для изменения коррелированной цветовой температуры всего светильника.

Для решения поставленной задачи предлагается светодиодный светильник [83], предназначенный для обеспечения общего освещения помещений белым светом с переменной цветовой температурой, структурная схема которого показана на рисунке 2.14.

Переменная цветовая температура в изделии реализуется за счет изменения доли спектров красного, синего и зеленого в общем спектре светильника. Для установки значения тока через кристаллы RGB-светодиодов используется блок управления источниками питания. Благодаря внутренней структуре и запрограммированному алгоритму он изменяет требуемые значения тока для всех

трех кристаллов, таким образом, чтобы при смешивании цветов получить белый свет нужной цветовой температуры.

Часы реального времени позволяют с достаточной точностью контролировать текущее астрономическое время и передавать его значение в блок управления источниками питания.



1.1 - 1.n – сборки RGB-светодиодов; 2.1 - 2.3 – источник питания; 3 – блок управления источниками питания; 4.1 - 4.m – RGB-светодиод; 5 – интерфейс задания и отображения; 6 – часы реального времени.

Рисунок 2.14 - Структурная схема устройства

Таким образом, реализуется принципиальная возможность создания светильника на основе светодиодов с функцией обеспечения переменной коррелированной цветовой температуры. При этом возможны различные алгоритмы поведения светильника. Возможно увеличение доли синего света в спектре только в вечерние и утренние часы, когда выделение мелатонина минимально, и побочных эффектов искусственное повышение бдительности не принесет, или возможно помимо этого кратковременное повышение доли синего в ночные часы на сложных участках пути, когда от локомотивной бригады требуется максимальная бдительность. Таким образом, применение светильников с переменной коррелированной цветовой температурой позволит повысить безопасность движения на железных дорогах [84].

## 2.4 Выводы по главе

1. Угол установки рабочих поверхностей пульта в пределах, регламентируемых нормами практически не оказывает влияния на равномерность освещения этих поверхностей.

2. Некоторые элементы пульта могут отбрасывать тень на рабочие поверхности. При разработке проекта общего освещения кабины машиниста следует учитывать эти особенности конструкции.

3. Специфика осветительного прибора для кабины машиниста на основе светодиодов требует иных математических подходов к расчету освещения по сравнению с осветительным прибором на основе лампы накаливания.

4. Специфика освещаемой зоны позволяет устанавливать в качестве светильника общего освещения приборы различной геометрии, и размеров, при этом если излучающая поверхность прибора выполнена в виде равнояркой поверхности, то неравномерность освещения будет соответствовать норме [85].

5. При разработке светильников для кабины машиниста необходимо учитывать их габаритную яркость.

6. При выборе габаритов при разработке светильника общего освещения необходимо учитывать взаимное расположение пультов управления, а также то, что слишком маленькие по размеру светильники будут иметь большую габаритную яркость, а слишком большие будут оказывать влияние на освещение другого пульта управления и, возможно, увеличивать ее неравномерность.

7. Показания неравномерности лучше у светильников, выполненных с длинной стороной вдоль рабочей поверхности.

8. Для решения вопросов общего освещения кабины машиниста крайне важен угол наклона внешних стекол кабины.

9. При невозможности обеспечения отражений от светильника в лобовых стеклах кабины машиниста необходимо помимо ограничения угла

распространения света ввести зеркальные вставки, позволяющие отклонить отраженный от стекла луч в сторону пола.

10. Кардинальным решением исключения отражения светильников в лобовых стеклах является введение наклона этих стекол на угол 15 градусов. Однако, данное решение может повлечь за собой определенные трудности в перекомпоновке кабины локомотива, а также устройств и систем, входящих в нее.

11. Применение светильников на основе светодиодов позволяет значительно снизить капитальные затраты на производство кабин машиниста за счет изготовления кабин более простой геометрической формы.

12. Для дополнительного увеличения безопасности движения принципиально возможно создать светильник с изменяемой во времени цветовой температурой.

## Глава 3. Разработка и исследование устройств на основе светодиодов для прожектора локомотива

### 3.1. Общие вопросы разработки прожектора на основе светодиодов

Для вновь разрабатываемых локомотивов требуется выполнение норм безопасности: значения осевой силы света прожекторов, которые приведены в таблице 3.1 [32-35].

Таблица 3.1 – Нормированные значения осевой силы прожектора

Режим работы локомотива	Осевая сила света, $I_0$ , кКд
«яркий свет»	640-960
«тусклый свет»	70-120

Кроме приведенных норм для локомотивного прожектора характерна глубокая диаграмма направленности с углом  $\varphi = 3^\circ$ . В прожекторах ранее выпущенных локомотивов применяются лампы накаливания мощностью  $P_{\text{лн}} = 500$  Вт с зеркальным отражателем, у которых световой поток примерно равен  $\Phi = 8000$  [86] Лм.

Так как основным параметром узкоградусной оптической системы является отношение осевой силы света к общему световому потоку излучателя, который характеризует абсолютную высоту пика на кривой силы света:

$$E_{ff} = \frac{I_0}{\Phi}, \quad (3.1)$$

где  $I_0$  – осевая сила света, Кд;  $\Phi$  – световой поток прибора, Лм.

Ламповый прожектор обладает характеристикой  $E_{ff} = 80-120$  Кд/Лм.

В настоящее время промышленностью выпускаются светодиоды со световым потоком  $\Phi = 8000$  Лм. Однако, обычно светодиоды имеют максимальное значение светового потока:  $\Phi_{\text{макс}} = 1000$  Лм. Следует отметить, что в светодиодах с большим световым потоком имеет место большая площадь с которой происходит излучение светодиода (световое тело – СТ). В этом случае решение вопроса эффективной фокусировки светового потока является трудоемкой и экономически неэффективной задачей.

Причина этого заключается в том, что при соизмеримых размерах СТ и вторичной оптики на одну и ту же точку оптики световые лучи от разных точек СТ, которое уже нельзя считать точечным, падают под разными углами, что в конечном итоге приводит к достаточно большой ширине пучка отраженного света [87], что увеличивает угловой размер элементарных отображений СТ.

На рисунке 3.1 приведена иллюстрация распространения светового потока для двух размеров светового тела. Если размеры СТ пренебрежимо малы, что соответствует точке СТ1, то угловой размер элементарного отображения будет:  $\alpha \approx 0$  и определяется длиной волны излучателя. При конечных размерах СТ, что представлено обозначением СТ2, угловой размер будет равен  $\alpha$ . Таким образом, увеличение размеров СТ обуславливает уменьшение осевой силы света излучателя.

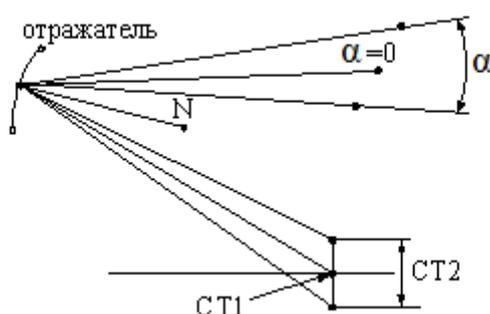


Рисунок 3.1 - Изменение ширины светового потока при различном размере светового тела

Для уменьшения влияния данного эффекта необходимо увеличивать габаритные размеры оптической системы, поверхность которой требует особых

высокоточных методов обработки. Исходя из этого, в качестве светодиода необходимо использовать кристалл синего излучения с люминофором, нанесенным на кристалле, а не RGB типа или УФ-светодиод с люминофором. Применение УФ-светодиода исключается по причине возможного появления большой доли УФ излучения в спектре прожектора.

Таким образом, особенность светодиодного прожектора с глубокой диаграммой направленности световой поток должен излучаться несколькими светодиодами с относительно малыми размерами СТ, каждый из которых имеет свою вторичную оптику [88].

Изложенное свидетельствует о том, что в светодиодных прожекторах должна использоваться распределенная оптика с  $N$  количеством единичных светодиодов в отличие от ламповых прожекторов с одним источником излучения.

В настоящее время существует два способа формирования требуемой диаграммы направленности светодиода: использование отражателя или использование линзы с эффектом полного внутреннего отражения.

Выбор отражателя для лампы накаливания в прожекторах вызван в первую очередь относительно простым способом обслуживания, так как машинисту при необходимости замены часто отказывающихся ламп требуется чистить загрязнённую отражающую поверхность. В случае светодиодной техники ситуация иная, использование отражателя в качестве светотехнической аппаратуры оставляет светодиод незащищенным от внешней среды. Иными словами, грязевые отложения легко покрывают светодиод, чистка которого вне места стоянки и ремонта практически невозможна. При этом можно легко повредить светодиод, и во многих ситуациях в эксплуатации чистку подобной системы выполнить практически невозможно без демонтажа прожектора.

Использование в светодиодных прожекторах линзы и холдера (держателя) плотно обволакивающего линзу со стороны отражающих граней, уменьшает загрязнение поверхности линзы и первичной оптики светодиода.

Особенность излучения светодиода заключается в том, что не весь свет, сгенерированный переходом, выводится из кристалла. Одну из основных причин

потерь составляет потеря на полное внутреннее отражение в связи с большим различием показателей преломления полупроводника  $n_{\text{П}}$  и воздуха  $n_{\text{В}}$ .

Угол полного внутреннего отражения излучения от границы воздух-кристалл определяется:

$$\text{Sin}(\alpha) = \frac{n_{\text{В}}}{n_{\text{П}}} \quad (3.2)$$

Для светодиодных кристаллов на основе InGaN-гетероструктур (используемых для получения кристалла излучавшего с синем спектре) критический угол составляет  $\alpha \approx 23^\circ$  [89].

Существует несколько путей повышения светового выхода из полупроводника. Эффективным способом [20] является помещение кристалла в среду с показателем преломления  $n_{\text{в}} < n < n_{\text{п}}$  для увеличения критического угла. Если в качестве среды использовать прозрачный эпоксидный компаунд, то критический угол  $\alpha$  возрастает. Если прибор предназначен для вывода излучения в воздух, то для сохранения коэффициента вывода излучения конфигурация полимерного покрытия должна быть такой, чтобы свет падал на поверхность раздела компаунд-воздух под углом, меньшим критического для этой границы. Таким образом, диаграмма направленности светодиода определяется конфигурацией этого компаунда.

Обычно для разработки и первоначального исследования вторичной оптики используют программные пакеты. Для моделирования светодиода можно представлять упрощенно в виде плоской равнояркой пластины, или, что более корректно, воспользоваться моделями, предлагаемыми производителем. Например, для программного пакета TracePRO используются файлы формата \*.dat, \*.ray. Конструкцию вторичной линзы можно рассчитать и построить в пакете твердотельного моделирования, например, в SolidWorks, после чего импортировать ее в пакет TracePRO.

### 3.2. Анализ геометрии узкоградусной оптики для светодиода с учетом потерь света

Существуют различные методы [90-99] расчета вторичной оптики светодиодов. Однако данные методы не рассматривают влияние геометрии линзы на оптические потери, которые оказывают существенное воздействие на систему при большой мощности излучателей. Очевидно, что это приводит к повышению мощности всего устройства, а также к дополнительному нагреву светодиода, что негативно сказывается на его ресурсе. Кроме того, специфика использования прибора на железнодорожном транспорте требует от вторичной оптики высоких показателей прочности, простоты в обслуживании и защиты светового излучателя от внешней среды. Примеры неоптимальной для подвижного состава вторичной оптики приведены на рисунках 3.2 и 3.3.

Рассмотрим особенности взаимодействия вторичной оптики со светодиодом и принципов конструирования основных элементов линзы [100-103], а учет возможных aberrаций опустим. Для получения узкой диаграммы направленности внешняя грань должна быть рассчитана таким образом, чтобы лучи света отражались полностью, т.е. имел место эффект полного внутреннего отражения. Внутренняя поверхность линзы, которая одновременно является отверстием для установки светодиода, отклоняет боковые лучи светодиода на угол полного внутреннего отражения для более эффективного использования светового потока в линзе. Форма отверстия для размещения светодиода должна выбираться исходя из условий увеличения световой эффективности линзы, а также технологичности изготовления линзы. При выборе формы и размера внутренней поверхности линзы необходимо учитывать, что размещение поверхности линзы на небольшом расстоянии от первичной оптики требуется для обеспечения корректного теплового режима светодиода, а также для уменьшения вероятности повреждения

светодиода при сборке. Кроме того, эффективно использовать часть внутренней поверхности линзы для фокусирования света (например, сферической линзой).



Рисунок 3.2 - Пример неоптимальной для ПС конструкции линзы.



Рисунок 3.3 - Пример неоптимальной конструкции линзы с механическими повреждениями.

Через определенное расстояние после сферической линзы можно выбрать часть материала линзы, что позволяет получить экономию на материале и стоимости изделия и уменьшить потери света, световой пучок которого уже сфокусирован. Расстояние, через которое можно выбрать часть материала определяется технологией производства.

На рисунке 3.4 приведена линза, имеющая следующие грани: сферической линзы для фокусирования центральных лучей СТ и параболического отражателя для фокусирования боковых лучей СТ. Применение в качестве внутренней грани полусферы позволяет уменьшить потери на отражении света при вводе его в линзу, что будет показано ниже, такое решение распространим на все остальные линзы.

На рисунке 3.5 приведена линза, отличающаяся от рисунка 3.2 тем, что в качестве собирающей линзы для центральных лучей СТ использована не сферическая линза, а линза Френеля.

На рисунке 3.6 приведена линза, имеющая следующие грани: сферическая линза для фокусирования центральных лучей СТ и система эллипсоидного отражателя с линзой для фокусирования боковых лучей СТ.

Предлагается сравнить представленные линзы на количество потерь света и световую эффективность при одинаковой площади светового выхода. Причем будут сравниваться отдельно элементы, отвечающие за фокусировку центральных лучей СТ и боковых лучей СТ. В качестве СТ будем использовать равнояркий излучатель с люминофором, нанесенным на чип.

Определим преимущества применения полусферы в качестве внутренней грани для линзы.

При попадании света на границу двух сред часть световой энергии не проходит через границу, а отражается от поверхности раздела. Таким образом имеют место потери света. Зависимость потерь света от угла падения описывается выражением (3.2) и приведена в виде графика на рисунке 3.7 [104, 105].

$$y(\alpha) = 0.5 \left( \frac{[\sin(\alpha - \arcsin\{n \cdot \sin(\alpha)\})]^2}{[\sin(\alpha + \arcsin\{n \cdot \sin(\alpha)\})]^2} + \frac{[\tan(\alpha - \arcsin\{n \cdot \sin(\alpha)\})]^2}{[\tan(\alpha + \arcsin\{n \cdot \sin(\alpha)\})]^2} \right), \quad (3.3)$$

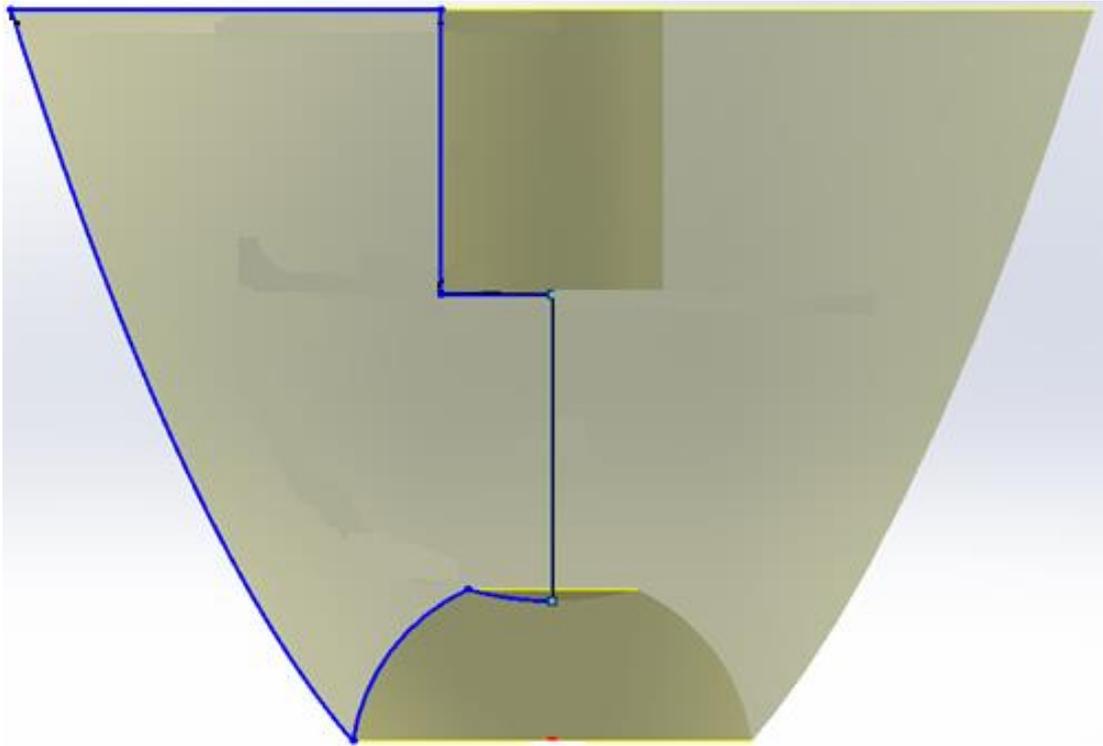


Рисунок 3.4 - Линза 1

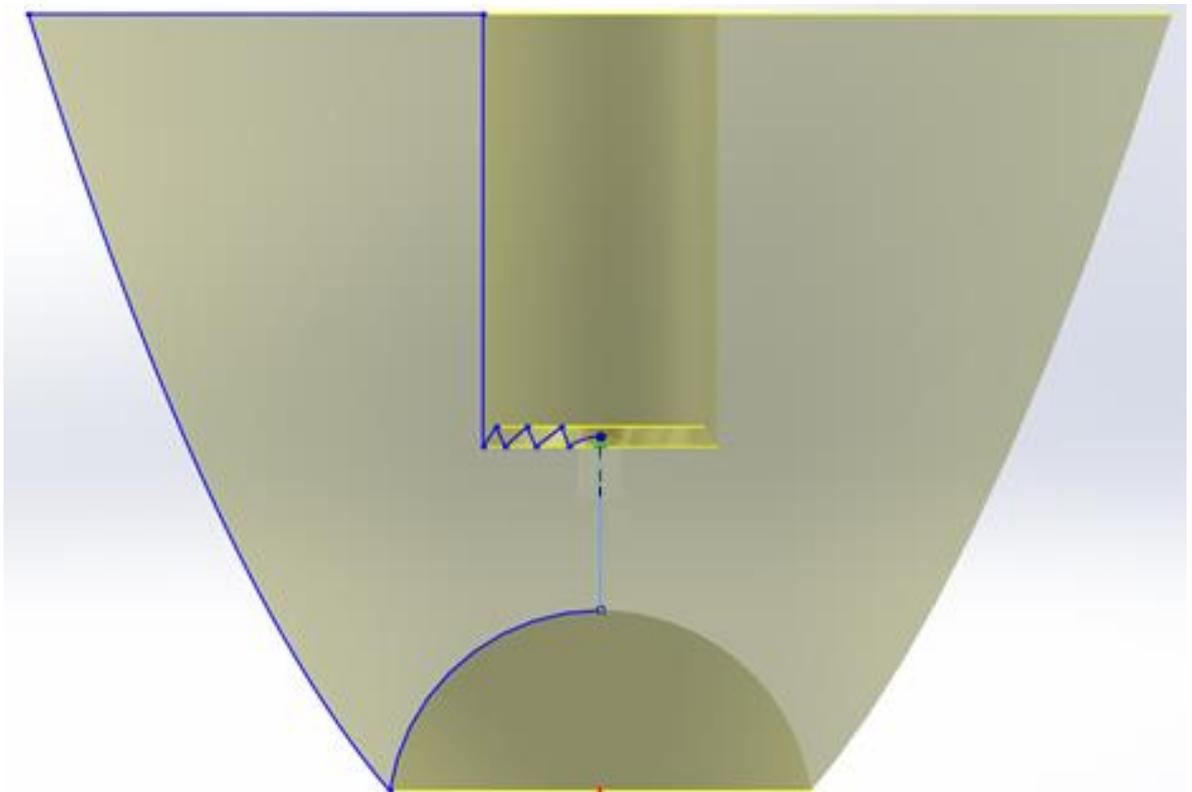


Рисунок 3.5 - Линза 2

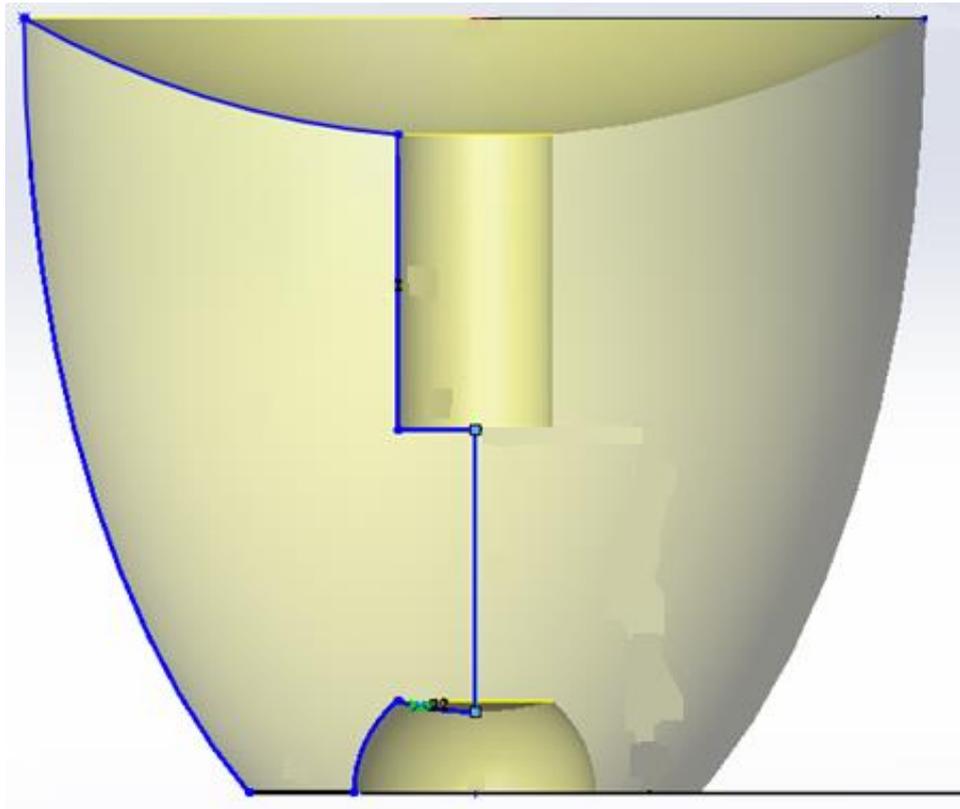


Рисунок 3.6 - Линза 3

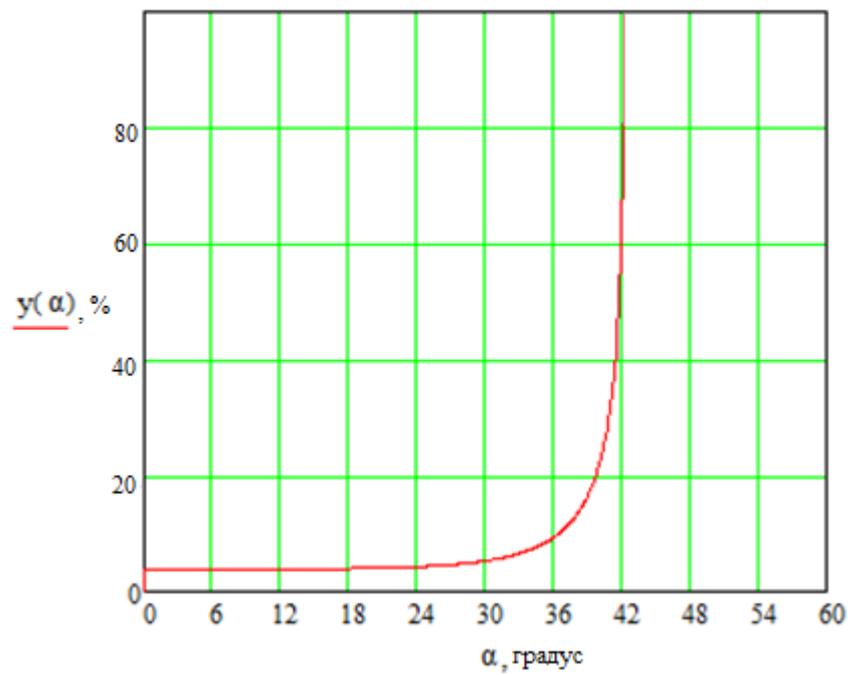


Рисунок 3.7 - Зависимость потерь света от угла падения светового луча на поверхность разделения двух сред

где  $\alpha$  – угол падения светового луча на поверхность разделения двух сред, градус;  
 $n$  – коэффициент преломления стекла.

При совпадении центра внутренней сферы с центром СТ свет будет падать на поверхность нормально. Таким образом, потери на отражение света при вводе излучения в линзу будут минимальны и равны

$$y = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2, \quad (3.4)$$

где  $n_1$  – коэффициент преломления стекла,  $n_2$  – коэффициент преломления воздуха.

Анализ графика на рисунке 3.5 показывает, что до угла падения в  $\alpha=18$  градусов потерь на отражение практически равны потерям при нормальном падении. Эффект полного внутреннего отражения (потери на отражение максимальны) наблюдается после угла падения в  $\alpha=42$  градуса.

Помимо угла падения на величину потерь на отражение влияет разность показателя преломления среды и оптического материала. Обычно линзы изготавливаются из ПММА ( $n=1,49$ ) или поликарбоната ( $n=1,56$ ). Эти материалы могут использоваться в широком диапазоне температур и подходят к применению на открытом воздухе. Отличие заключается в том, что ПММА более твердый материал, а значит более стойкий к абразивным воздействиям, но в отличие от поликарбоната горюч и поддерживает горение (кислородный индекс 17,3), кислородный индекс поликарбоната равен 25, из-за чего поликарбонат не поддерживает горение при отсутствии внешнего пламени.

Кроме того, при выборе материала линзы следует знать коэффициент поглощения материала для уменьшения потерь при прохождении света в толще материала согласно закону Бугера. Коэффициент поглощения ПММА равен  $0,03 \text{ см}^{-1}$  [106], а для поликарбоната он может быть более  $0,037 \text{ см}^{-1}$  [107]. Таким образом рекомендуется использовать ПММА для изготовления линз.

Рассмотрим потери на отражение для сферической собирающей линзы (примененной на рисунке 3.4 и 3.6). СТ находится в фокусе линзы.

Можно показать, что угол преломленного луча к нормали в зависимости от угла излучения  $\varphi$  равен.

Здесь и далее расчет взаимозависимых углов ведется в ортогональной системе координат с построением световых лучей и граней линзы. Для анализа применяются методы аналитической геометрии. В тексте работы автор опускает эти выкладки.

$$m(\varphi) = \arctan\left(\frac{\sin(\varphi)}{n - \cos(\varphi)}\right) \quad (3.5)$$

Тогда угол падения в зависимости от угла излучения равен.

$$\alpha(\varphi) = m(\varphi) - \varphi, \quad (3.6)$$

где  $\varphi$  – угол излучения СТ относительно нормали к его поверхности, градус;  $n$  – коэффициент преломления стекла.

Зависимость потери силы света на отражение от угла излучения СТ представлены на рисунке 3.8

Проанализировав рисунок 3.8, можно считать, что потери на отражения в угле излучения до 10 градусов от нормали примерно равны потерям на нормальное падение. Кроме того, обычно не сферические линзы не используются при угле излучения от нормали более 15 из-за большой сферической аберрации системы.

Рассмотрим потери на отражение для ступенчатой (линза Френеля) собирающей линзы (см. рисунок 3.3). СТ находится в фокусе линзы.

Найдем зависимость угла преломленного луча к нормали от угла излучения в виде:

$$m(\varphi) = \arctan\left(\frac{n \cdot \sin(\varphi)}{n \cdot \cos(\varphi) - 1}\right) \quad (3.7)$$

Угол падения в зависимости от угла излучения находится из выражения (3.6).

Зависимость потерь на отражение от угла излучения СТ, полученная путем подстановки выражения (3.7) в (3.3), представлена на рисунке 3.9.

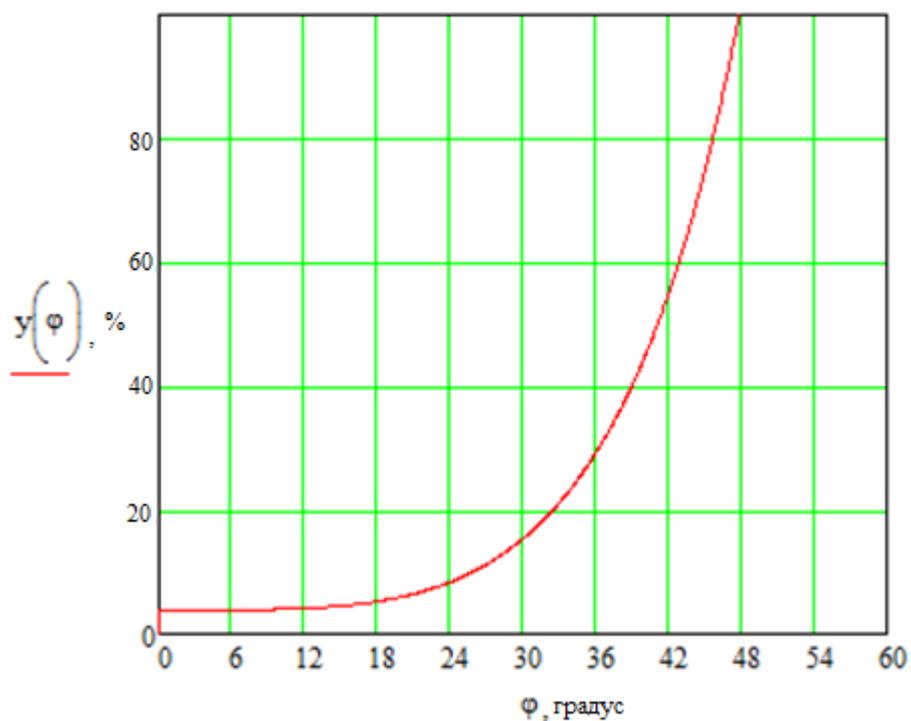


Рисунок 3.8 - Зависимость потери силы света на отражение в зависимости от угла излучения света СТ, сферическая линза

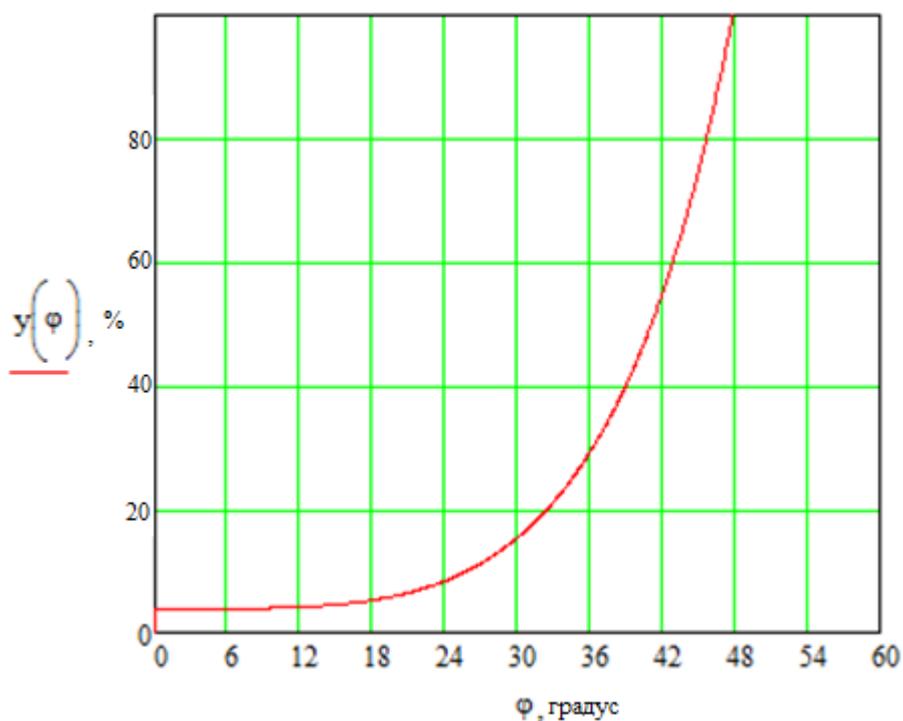


Рисунок 3.9 - Зависимость потерь силы света на отражение в зависимости от угла излучения света СТ, линза Френеля

Анализ графиков на рисунках 3.8 и 3.9 показывает, что принципиальные различия в потерях на отражение в этих двух случаях отсутствуют. Поэтому необходимо опираться на иные технические и физические характеристики этих элементов.

В частности, для центральных углов СТ излучаемых от нормали на угол до 7 градусов разница между линзами отсутствует, т.к. это пространство у ступенчатой линзы обычно фокусируется сферическим элементом [88]. Кроме того, ступенчатая линзы при равном диаметре со сферической будет иметь меньшую силу света за счет не полного заполнения светового отверстия светлой частью.

Поэтому, если фокусируется пучок центральных лучей СТ в малых углах, то необходимо использовать сферическую линзу из-за большего заполнения светового отверстия светлой частью.

Потери светового потока на сферической линзе можно рассчитать следующим образом.

$$LOSS(\varphi) = \frac{\Phi(\varphi)}{\Phi_0}, \quad (3.6)$$

где  $\Phi_0$  – исходный световой поток светодиода, Лм;  $\Phi(\varphi)$  – отраженный световой поток светодиода, Лм.

Раскроем выражение (3.6) и после сокращения констант получим:

$$LOSS(\varphi) = \frac{\int_0^{\varphi} y(\varphi) \cos(\varphi) \sin(\varphi) d\varphi}{\int_0^{90} \cos(\varphi) \sin(\varphi) d\varphi} \quad (3.7)$$

Результаты расчета потерь светового потока приведены на рисунке 3.10.

Анализ графика на рисунке 3.10 показывает, что потери от общего светового потока на отражение об грань центрального собирающего элемента линзы, вплоть до охвата в 10 градусов, незначительны на фоне общего светового потока светодиода. Это говорит о том, что выбор максимального угла охвата центрального собирающего элемента линзы в 10 градусов с точки зрения оптических потерь оправдан.

Расчет размеров и положения сферической линзы выполняется следующим образом.

Уравнение сферической линзы можно записать в виде:

$$\frac{n_в}{f} = (n_c - n_в) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} + \frac{(n_c - n_в)d}{r_1 r_2 n_c} \right), \quad (3.8)$$

где  $n_c$  – показатель преломления материала линзы;  $n_в$  – показатель преломления воздуха;  $f$  – фокусное расстояние линзы, м;  $r_1$  – радиус кривизны поверхности ближе к светодиоду, м;  $r_2$  – радиус кривизны поверхности дальше от светодиода, м;  $d$  – толщина линзы, м.

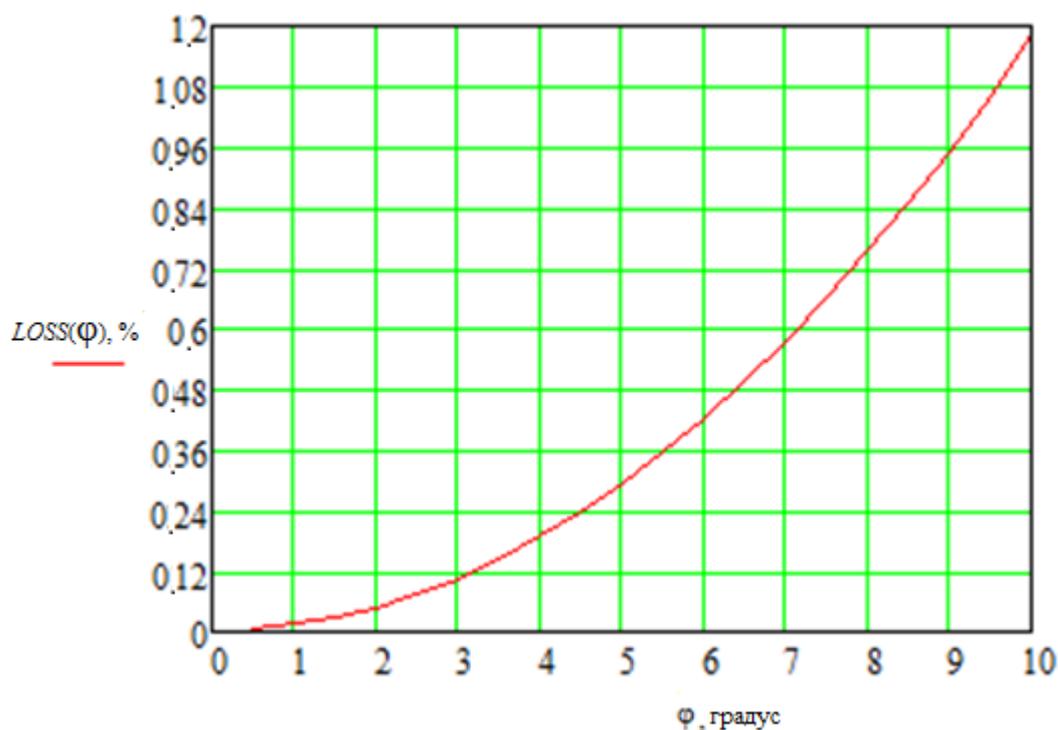


Рисунок 3.10 - Потери светового потока в зависимости от угла фокусированного пучка

Исходя из изложенного выше положения о выборке части материала линзы, целесообразно выполнить выборку материала линзы в ее объеме в виде цилиндра. Таким образом, можно считать, что  $r_2 = \infty$ ,

$$\frac{n_в}{f} = (n_c - n_в) \frac{1}{r_1} \quad (3.9)$$

Выражение (3.8) содержит 2 параметра:  $r_1$  и  $f$ , один из этих параметров будет определен в зависимости от конструкции линзы, второй будет рассчитан.

Рассмотрим потери на отражение для параболической грани (см. рисунки 3.4 и 3.5). Эта грань должна работать по принципу полного внутреннего отражения, таким образом, все лучи которые на нее попадают должны претерпевать полное внутреннее отражение.

Найдем зависимость угла падающего луча к нормали касательной параболы от угла излучения СТ. Для этого необходимо произвести серию преобразований.

Коэффициент прямой в ортогональной системе координат для луча, излучаемого СТ в зависимости от угла излучения от нормали к поверхности СТ равен:

$$k(\varphi) = \frac{1}{\tan(\varphi)} \quad (3.10)$$

Координату точки касания параболы и касательной  $x_0(\varphi)$  можно вычислить из выражения [108].

$$x_0(\varphi) = \frac{k(\varphi) + \sqrt{k(\varphi)^2 + 1}}{p^{-1}}, \quad (3.11)$$

где  $p$  – параметр параболы, м.

$$m(\varphi) = \frac{x_0(\varphi)k(\varphi) + p}{pk(\varphi) - x_0(\varphi)}, \quad (3.12)$$

где  $m(\varphi)$  – тангенс угла между углом излученного СТ луча и касательной.

$$\gamma(\varphi) = \left| \arctan \{m(\varphi)\} \right|, \quad (3.13)$$

где  $\gamma(\varphi)$  – угол между углом излученного СТ луча и перпендикуляра к касательной, градус.

Результаты расчёта приведены на рисунке 3.11. Как видно из графика, все лучи СТ претерпевают полное внутреннее отражение.

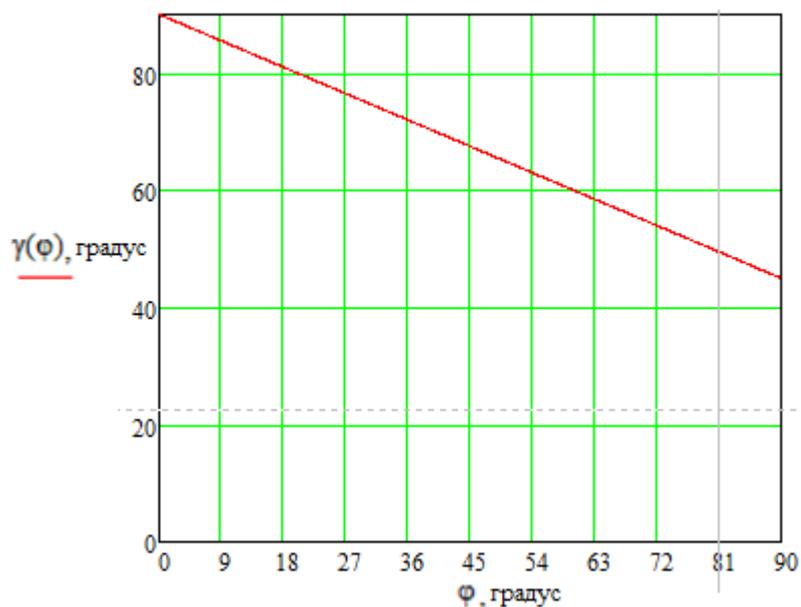


Рисунок 3.11 - Угол падения луча СТ на грань параболы в зависимости от угла излучения луча СТ при параметре параболы  $p=0,5$

Рассмотрим зависимость осевой силы света от параметра параболы.

Осевая сила света, согласно закону Манжена, вычисляется следующим образом.

$$I = hLS, \quad (3.14)$$

где  $L$  – яркость СТ, Кд/м<sup>2</sup>;  $S$  – площадь выхода света, м<sup>2</sup>;  $h$  – световой КПД оптики, где:

$$h = t h_1 h_2, \quad (3.15)$$

где  $t$  – коэффициент пропускания оптики;  $h_1$  – коэффициент использования оптики;  $h_2$  – коэффициент использования светового потока.

$$h = tF \frac{F_w}{F_0 F_w}, \quad (3.16)$$

где  $F_w$  – полный световой поток в пределах угла охвата, Лм;  $F_0$  – полный световой поток прожектора, Лм;  $F$  – полезно используемый световой поток, Лм [109].

Объем линзы рассчитывается согласно выражению.

$$V = 0.5([h + f]S - f S_0), \quad (3.17)$$

где  $S$  – площадь выхода света,  $\text{м}^2$ ;  $h$  – высота линзы,  $\text{м}$ ;  $S_0$  – площадь основания линзы,  $\text{м}^2$ ;  $f$  – фокусное расстояние,  $\text{м}$ .

На рисунках 3.12 и 3.13 представлены графики зависимости силы света параболоидного отражателя и объем линзы в зависимости от параметра параболы при фиксированной высоте параболоида. Анализ графиков показывает, что при увеличении параметра параболы ее объем и осевая сила света увеличиваются. С другой стороны, уменьшение высоты линзы уменьшает массогабаритные показатели линзы значительно сильнее, чем ее осевую силу света. Таким образом, выгодно варьировать высоту линзы, следя за тем, чтобы эти изменения не привели к наличию несфокусированного центральным элементом линзы пучка света.

Ослабление света в материале можно оценить по закону Бугера:

$$I(\varphi) = I_0 e^{-k_\lambda l(\varphi)}, \quad (3.18)$$

где  $I_0$  – интенсивность входящего пучка,  $\text{Кд}$ ;  $l(\varphi)$  – толщина слоя вещества, которую проходит луч светового тела в зависимости от угла излучения луча,  $\text{м}$ ;  $k_\lambda$  – показатель поглощения вещества,  $\text{м}^{-1}$ .

Для каждого вещества показатель  $k_\lambda$  различен, кроме того, его величина зависит от длины волны.

Потери светового потока на прохождение в среде параболоидной части линзы можно рассчитать следующим образом.

$$LOSS(\varphi) = \frac{\Phi_0(\varphi) - \Phi(\varphi)}{\Phi_0}, \quad (3.19)$$

где  $\Phi_0(\varphi)$  – исходный световой поток светодиода, который попадает на параболическую часть линзы,  $\text{Лм}$ ;  $\Phi(\varphi)$  – световой поток светодиода, попавший на параболическую часть линзы и прошел через толщу стекла,  $\text{Лм}$ .

Раскроем выражение (3.18), сократив константы.

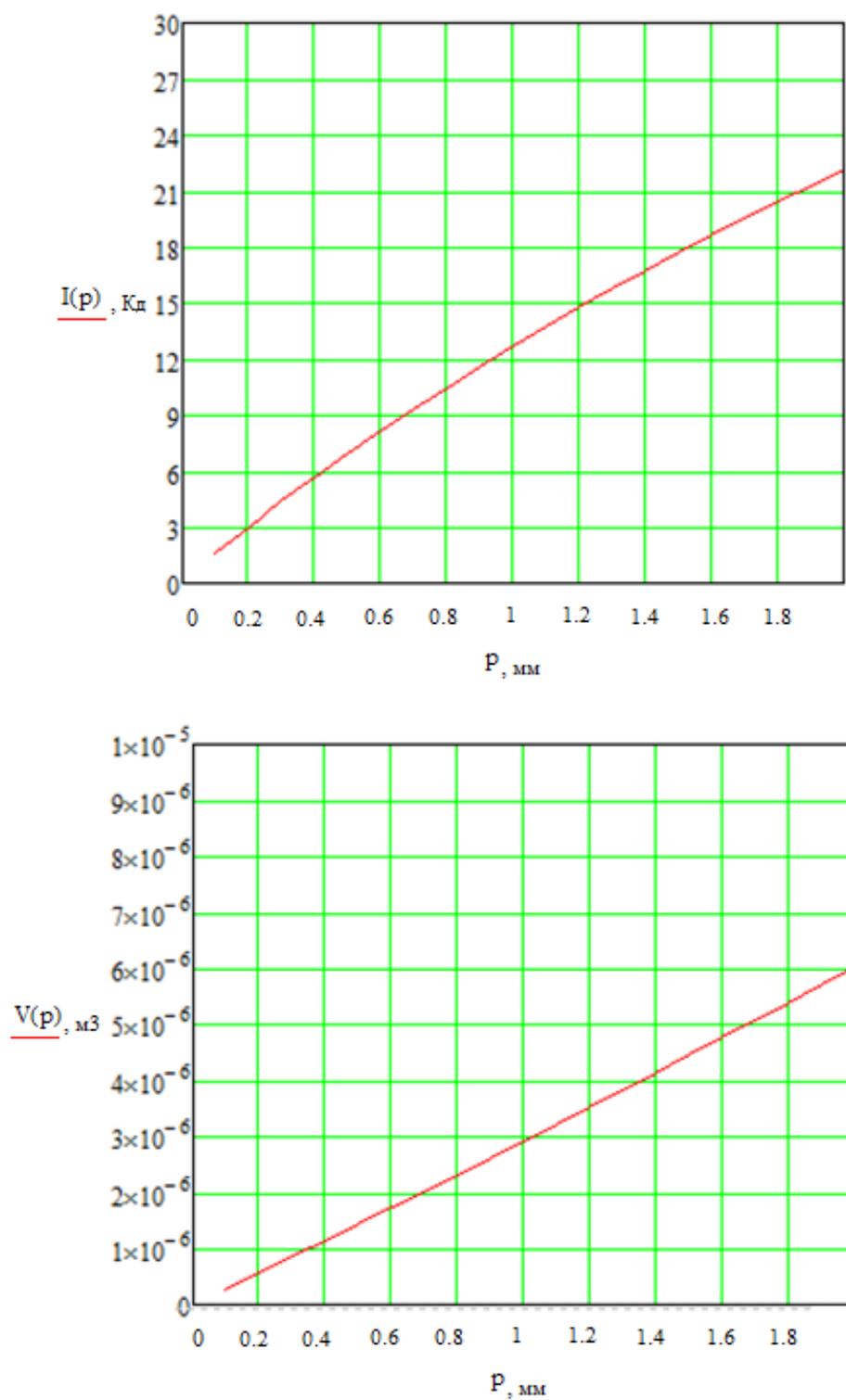


Рисунок 3.12 - Графики зависимости силы света параболоидного отражателя и объема линзы в зависимости от параметра параболы при фиксированной высоте параболоида равной 30 мм

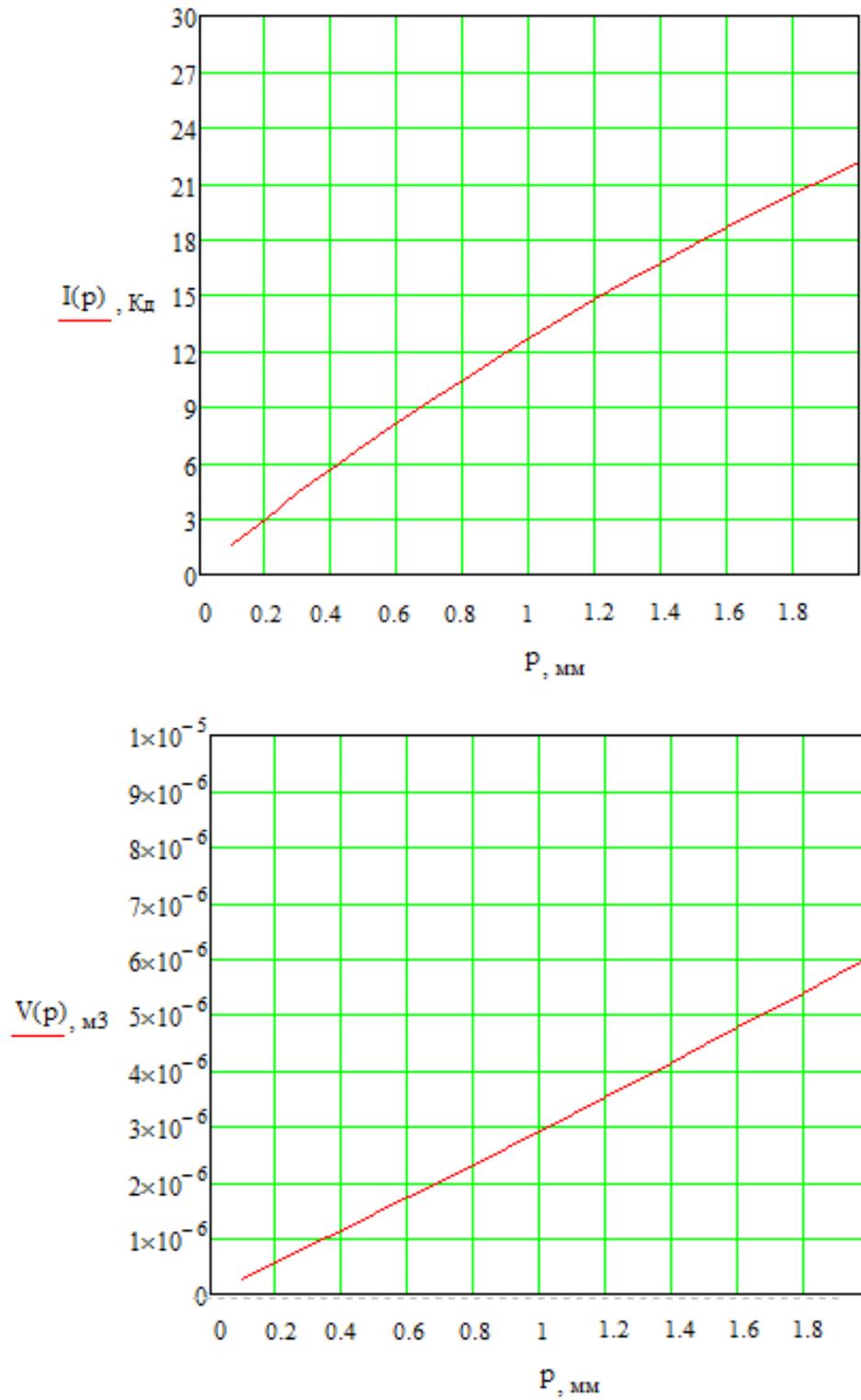


Рисунок 3.13 - Графики зависимости силы света параболоидного отражателя и объема линзы в зависимости от параметра параболы при фиксированной высоте параболоида равной 10 мм

$$LOSS(\varphi) = \frac{\int_{\varphi}^{90} \cos(\varphi) \sin(\varphi) d\varphi - \int_{\varphi}^{90} e^{-k\lambda l(\varphi)} \cos(\varphi) \sin(\varphi) d\varphi}{\int_0^{90} \cos(\varphi) \sin(\varphi) d\varphi} \quad (3.20)$$

$$l(\varphi) = H - y_0(\varphi) - r + \sqrt{y_0(\varphi)^2 + x_0(\varphi)^2}, \quad (3.21)$$

где  $r$  – радиус внутренней сферы, м;  $y_0(\varphi)$ ,  $x_0(\varphi)$  – координаты точки отражения света, м;  $H$  – высота линзы, м.

Расчёт абсциссы точки касания  $x_0(\varphi)$  проводится по (3.8), тогда ордината этой точки находится из стандартного выражения параболы.

Результаты расчета при параметре параболы  $p=7$  приведены на рисунке 3.14. Анализ графика на рисунке 3.14 показывает, что потери света на прохождение через материал незначительны и пропорциональны высоте линзы. При этом выгодно обхватывать световой поток с угла в  $\varphi=10$  градусов, т.к. при увеличении этого значения потери на прохождение в материале принципиально не изменяются, а эффективность центральной собирающей линзы резко падает.

Рассмотрим потери на отражение для эллиптической грани (см. рисунок 3.6). Эта грань должна работать по принципу полного внутреннего отражения. Таким образом, все лучи которые на нее попадают должны претерпевать полное внутреннее отражение. Будем рассматривать эллипс фиксированной высоты, но переменной ширины.

Найдем зависимость падающего луча к нормали касательной параболы от угла излучения СТ.

Коэффициент прямой луча, испущенного СТ в зависимости от угла излучения от нормали к поверхности СТ  $k(\varphi)$  рассчитывается согласно выражению (3.9).

$$x_0(\varphi) = \frac{k(\varphi)\sqrt{b^2 - a^2} + \sqrt{[k(\varphi)\sqrt{b^2 - a^2}]^2 + a^2[k(\varphi)^2 + \frac{b^2}{a}]}}{k(\varphi)^2 + \frac{b^2}{a}}, \quad (3.22)$$

где  $x_0(\varphi)$  – координата точки касания эллипса и касательной, м;  $a, b$  – параметры эллипса, м.

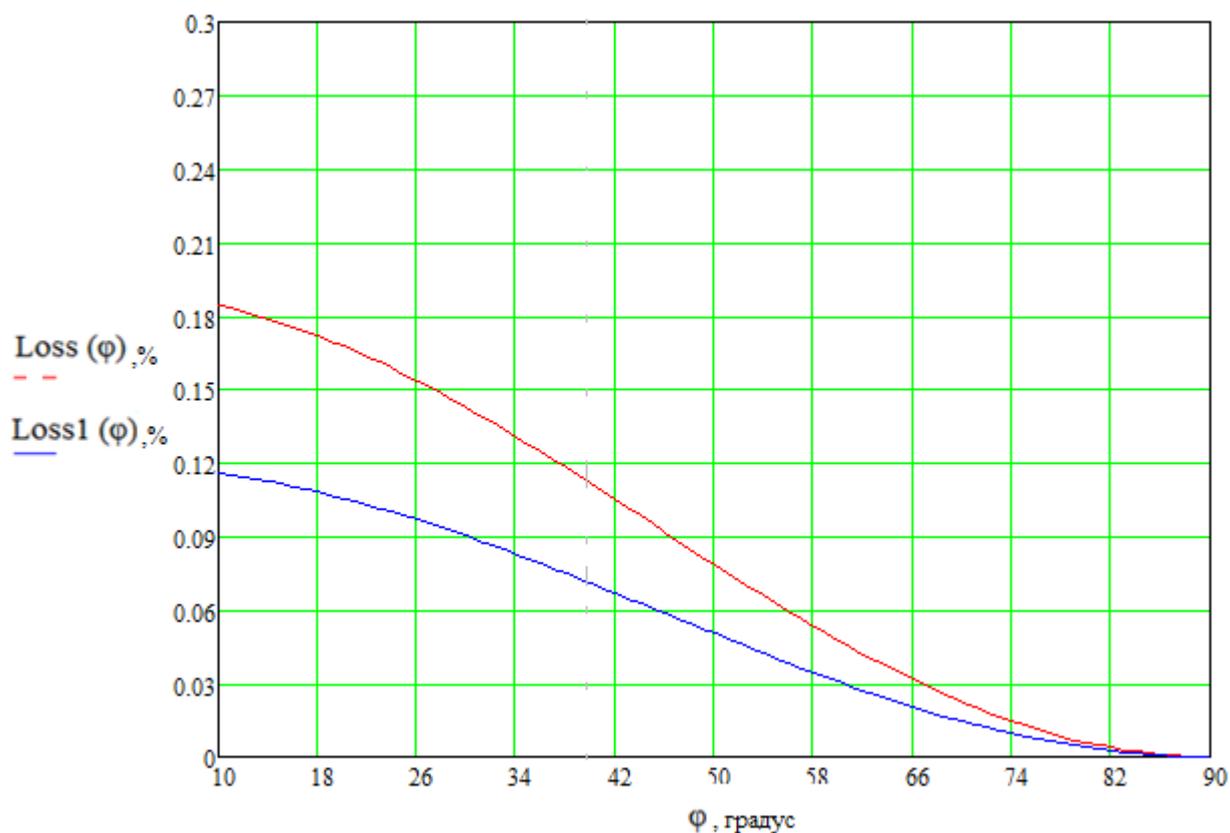


Рисунок 3.14 - Потери в материале линзы при высоте линзы 10 см. (пунктир) и 4 см. в зависимости от угла с которого свет попадает на отражатель

$$y_0(\varphi) = -\sqrt{b^2 - \left(\frac{bx_0(\varphi)}{a}\right)^2} + \sqrt{b^2 - a^2} \quad (3.23)$$

где  $y_0(\varphi)$  – координата точки касания эллипса и касательной, м.

$$k_1(\varphi) = \frac{a^2 y_0}{b^2 x_0}, \quad (3.24)$$

где  $k_1(\varphi)$  – тангенс угла наклона прямой перпендикулярной к касательной эллипса.

$$m(\varphi) = \frac{k(\varphi) - k_1(\varphi)}{k_1(\varphi)k(\varphi) + 1}, \quad (3.25)$$

где  $m(\varphi)$  – тангенс угла между углом излученного СТ луча и перпендикуляра к касательной.

Величина угла  $\gamma(\varphi)$  рассчитывается по выражению (3.13).

Результаты расчёта угла падения светового луча на грань линзы приведены на графиках рисунка 3.15.

Как видно из рисунка 3.15, часть излучения светодиода не претерпевает полного внутреннего отражения на гранях эллипса, при этом отношение габаритов оптической системы к осевой силе света меньше, чем у параболоида. Это говорит о том, что использовать эллипсоидную поверхность в качестве внешней грани при разработке линзы с эффектом полного внутреннего отражения не эффективно.

Рассмотрим зависимость осевой силы света от параметра эллипса. По причине того, что часть излучения светодиода не претерпевает полного внутреннего отражения, представим, что линза выполнена в виде зеркального эллипсоидного отражателя с линзой на выходе.

Осевая сила света, будет считаться согласно выражению (3.14), потери на отражение от внешней грани не учитываем.

Объем отражателя рассчитывается следующим образом.

$$V = \frac{2}{3} \pi [b a^2 - \left(\frac{b^2}{a}\right) (b - \sqrt{b^2 - a^2})], \quad (3.26)$$

Результаты расчета приведены на рисунках 3.16 и 3.17. На основании анализа графиков на рисунках 3.12, 3.13, 3.15, 3.16, можно сделать вывод о том, что линза на основе эллиптической грани имеет худшие массо-габаритные характеристики при меньшей силе света по сравнению с параболической гранью.

Кроме прочих недостатков, линза на рисунке 3.6 имеет тонкую кромку в своей верхней части, которая требует дополнительной механической защиты в эксплуатации.

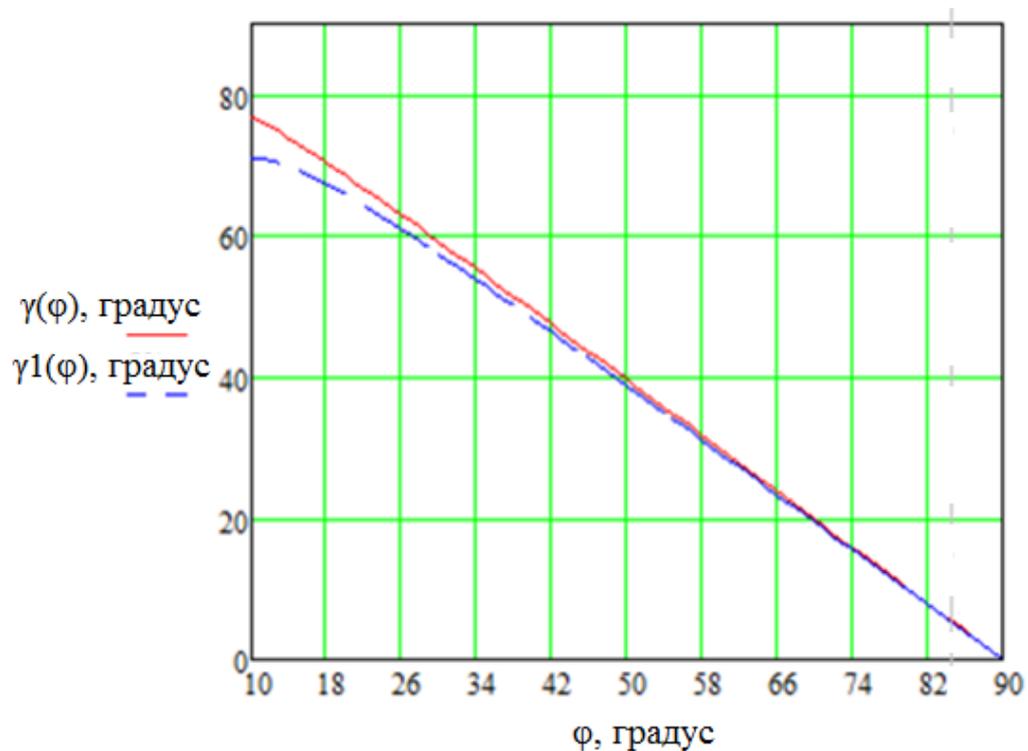


Рисунок 3.15 - Угол падения луча СТ на грань эллипса в зависимости от угла излучения луча СТ при параметре  $a=5$  см (пунктир) и  $a=7$  см

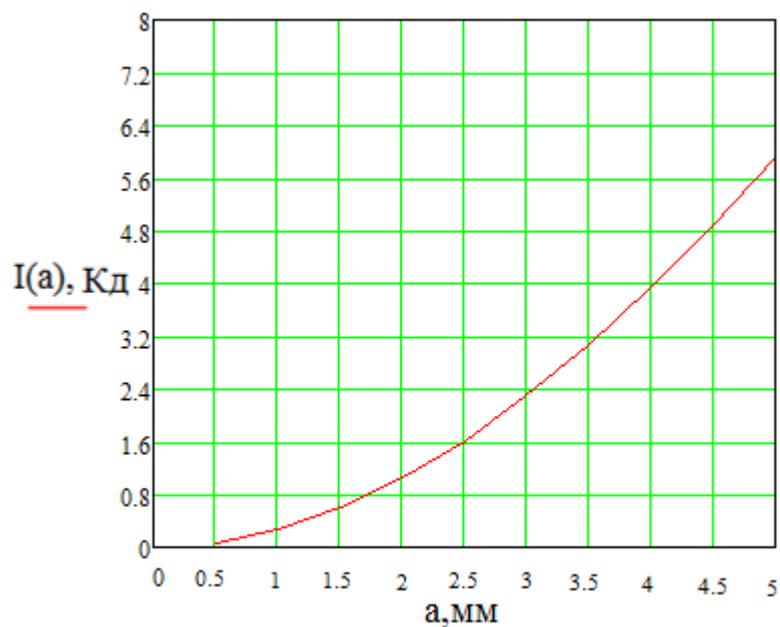


Рисунок 3.16 - Осевая сила света системы эллипсоидный отражатель – линза в зависимости от параметра эллипса  $a$

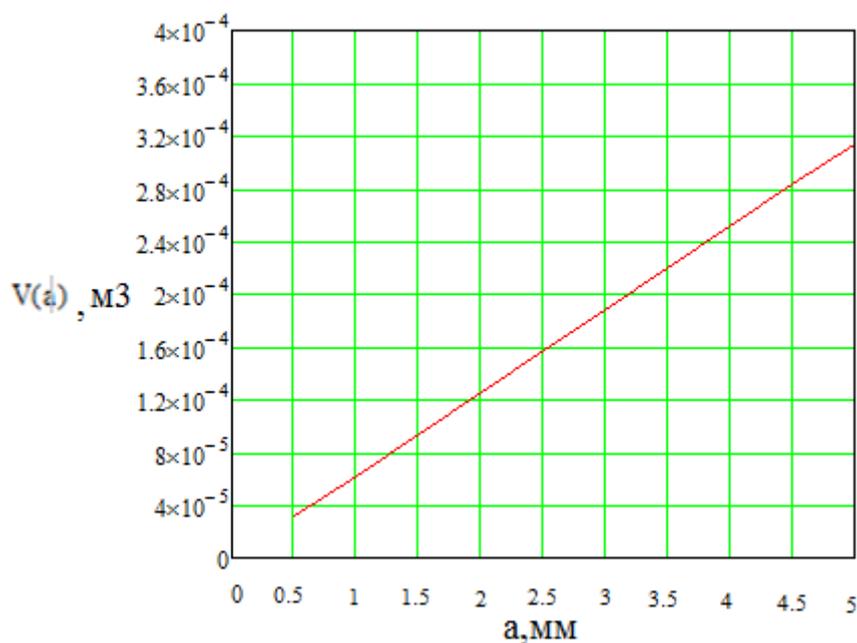


Рисунок 3.17 - Объем эллипсоидного отражателя в зависимости от параметра эллипса  $a$

Дополнительно для уменьшения потерь на отражение на внутренней поверхности линзы возможно введение в область полусферы состава с показателем преломления близким к материалу линзы [110], однако это решение значительно усложнит обслуживание прибора в эксплуатации за счет того, что сборка-разборка подобной конструкции затруднительна. Кроме того, при таком решении возникают дополнительные сложности, связанные с механическим взаимодействием окружающего светодиод состава с первичной линзой светодиода.

### 3.3. Практические результаты разработки оптической системы прожектора

По результатам проведенных исследований выполнено практическое конструирование светодиодных прожекторов [111], внедренных в опытную эксплуатацию на АО «РЖД» в ряде локомотивов.

На рисунке 3.18 показаны различные модификации разработанного модульного светодиодного прожектора. Модульный светодиодный прожектор предназначен для освещения железнодорожного пути перед локомотивом в тёмное время суток, мощность потребления для данных устройств составляет не более 140 Вт, что ниже мощности потребления прожектора на основе ЛН в 3,57 раз. Конструкция модульного светодиодного прожектора состоит из нескольких независимых светодиодных цепочек с индивидуальными источниками питания.

Светодиоды, и фокусирующая сборка, представляют собой оптическую систему модульного светодиодного прожектора. При этом фокусирующая сборка состоит из держателя из поликарбоната и асферической линзы из прозрачного оргстекла или УФ-стабилизированного поликарбоната.

При этом для эффективного отвода тепла от светодиодов используются платы на основе алюминия и алюминиевые радиаторы.

Уровень светового потока от модульного светодиодного прожектора регулируется дискретно в двух положениях: «ярко» (100%) и «тускло» (10%). Регулировка обеспечивается подачей управляющей команды на разъем источника питания.

Так как светодиод практически не имеет излучения в инфракрасной области, то защитные стекла прожекторной ниши могут подвергаться обледенению и запотеванию при эксплуатации. В этом случае необходимо применять дополнительные методы обогрева защитного стекла в нише прожектора.

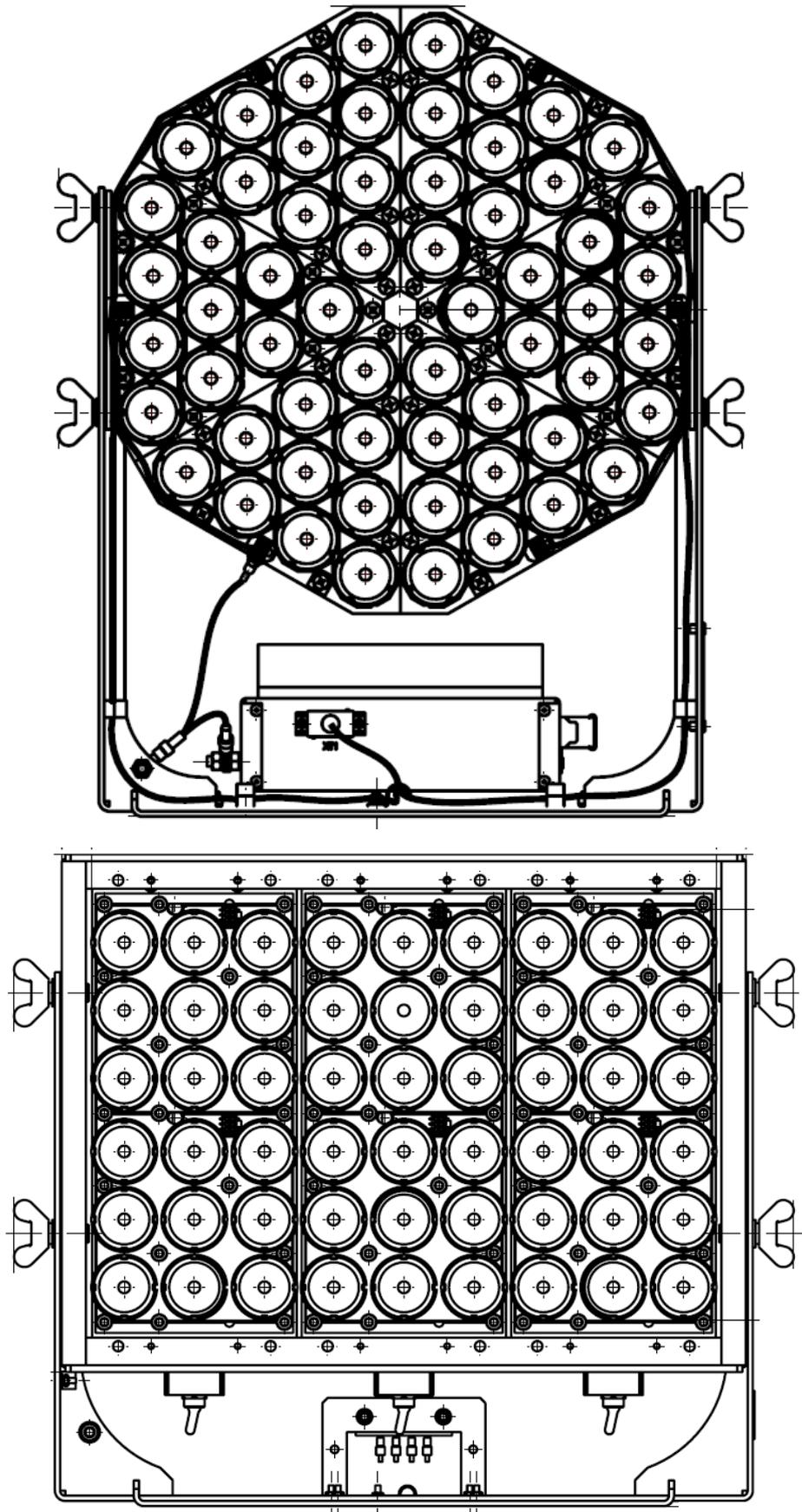


Рисунок 3.18 – Примеры конструкции модульных светодиодных прожекторов

На рисунке 3.19 представлен электровоз с установленным на него прожектором на основе светодиодов. Как видно из рисунка 3.22, на стекле прожекторной ниши имеются следы от световых пучков отдельных линз, это говорит о том, что: во-первых, при разработке прожектора также необходимо учитывать потери на защитное стекло, которые могут быть весьма значительными, особенно если на стекле имеются элементы обогрева; во-вторых, следует учитывать тепловой режим изделия в нише, т.к. она может сильно нагреваться солнечными лучами или наоборот быть теплоизолированной от окружающей среды.

Существуют исследования, подтверждающие высокий ресурс светодиодов как оптоэлектронного компонента [112], но эти исследования не рассматривали ресурс изделия в целом: источник питания, оптика и т.д. Были проведены ресурсные испытания лобового светодиодного прожектора в сборе. Они проводились для светодиодного лобового прожектора производства АО НПО Автоматики, применяемого на электровозе 2ЭС10.

Испытания проводились в нормальных климатических условиях на рабочем месте с источником питания 110В в специальном помещении с отсутствием паразитных источников света. Перед каждым измерением со светоизлучающей части изделия удалялась грязь, контролировалась только осевая сила света прибора, так как именно этот параметр является наиболее важным для прожектора. Результаты испытаний подтвердили высокий ресурс изделия. График на рисунке 3.20 показывает, что на протяжении 4000 часов испытаний осевая сила света изменилась в рамках погрешности измерений (+/- 2.5%).



Рисунок 3.19 - Вид прожектора локомотива со светодиодными излучателями

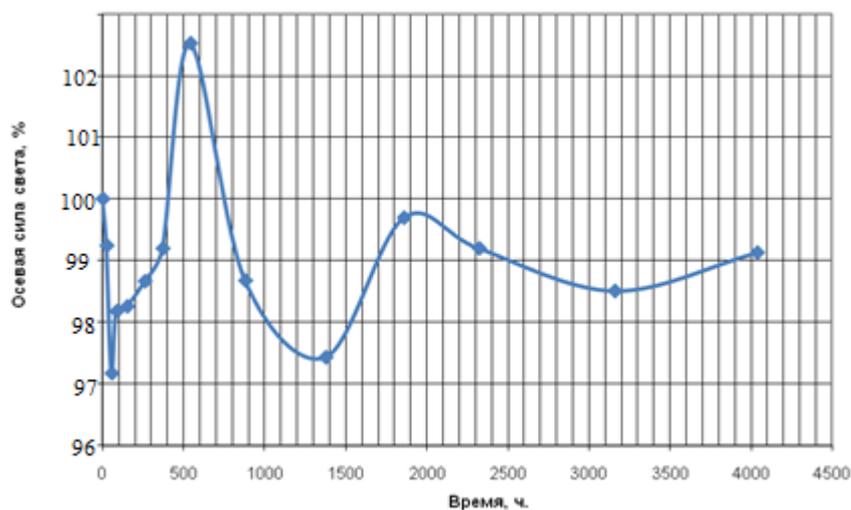


Рисунок 3.20 - Результаты ресурсных испытаний светодиодного прожектора

Повышенный ресурс светодиодных прожекторов не исключает возможности одиночных отказов. Если в случае использования ламп накаливания это приводит к полному отказу прожекторного прибора, и в случае прожектора машинисту необходимо срочно заменять лампу, иначе движение продолжать невозможно.

Светодиодный прожектор производства АО НПО Автоматики имеет сегментную структуру с «горячим» резервированием: отказы происходят посегментно и отказ одного-нескольких сегментов не приводит к понижению осевой силы света локомотива ниже норм безопасности, что позволяет продолжить движение локомотива без остановок.

Опыт эксплуатации Свердловской железной дороги на примере электровозов 2ЭС6 (лобовой прожектор ламповый) и 2ЭС10 (лобовой прожектор светодиодный) показал, что за период 01.2013-04.2014г.г. на 380 локомотивов 2ЭС6 было заменено 1180 ламп КГМ 110-600 (600 Вт, среднее время горения 500ч., стоимость 300-500 рублей, исходя из цен в интернете на 05.2014), в то время как на 90 локомотивов 2ЭС10 произошло 4 отказа 1/6 части прожектора (16% потери светового потока), которые не привели к остановке состава (при этом причина отказов была связана с браком комплектующих изделий, входящих в источник питания). В настоящее время разработаны опытные образцы прожекторов с мощностью потребления не более 25 Вт, но они не прошли весь цикл испытания перед внедрением в эксплуатацию.

Таким образом, применение светодиодов для построения системы прожекторного освещения локомотива повышает безопасность движения, снижая при этом затраты на покупку запасных частей более чем на 265 тыс. рублей в год на парк в 380 локомотивов. Частота и время возможных простоев локомотива, ремонтных работ, а также стоимость складских расходов также будут уменьшены.

Методика анализа экономической эффективности внедрения устройств на основе светодиодов в светотехническую аппаратуру подвижного состава и получаемые при этом результаты зависят от функций, выполняемых внедряемыми устройствами, и от этапа жизненного цикла подвижного состава на котором происходит внедрение.

По функциям, выполняемым светотехникой, ее можно разделить на две группы: светотехника, отказ которой критично сказывается на безопасности движения, светотехника, отказ которой не критичен для безопасности движения. К первой группе можно отнести: прожектор, буферный (сигнальный) фонарь [113],

освещение кабины машиниста. Ко второй относятся элементы освещения вспомогательных и технических помещений, а также подсветка ходовых частей. Можно выделить два этапа жизненного цикла подвижного состава на котором происходит внедрение: замена существующих светотехнических элементов на эксплуатируемых локомотивах во время модернизации конкретного образца и разработки новых серий (модернизация существующих серий) локомотивов с установкой на них светодиодных светотехнических устройств.

Если принять, что при внедрении светодиодная техника используется идентично заменяемой (на основе ламп накаливания) и устанавливается в аналогичные места, то количество светотехники на основе ламп накаливания ( $m_{ЛН}$ ) и на основе светодиодов ( $m_{СИД}$ ) одинаково:

$$m_{ЛН} = m_{СИД} = m, \quad (3.27)$$

При выполнении равенства (3.28), экономическая эффективность от внедрения устройств на основе светодиодов в светотехнику подвижного состава при замене действующих устройств на эксплуатируемом подвижном составе может быть определена следующим относительным выражением

$$\delta_{\text{эк}} = \frac{\sum_{i=1}^m (\mathcal{E}_{ЛНi} + \mathcal{Y}_{ЛНi})}{\sum_{i=1}^m (K_{СИДi} + \mathcal{E}_{СИДi} + \mathcal{Y}_{СИДi})}, \quad (3.28)$$

где  $\mathcal{E}_{ЛН}$  и  $\mathcal{E}_{СИД}$  – эксплуатационные расходы на обслуживание действующих устройств и устройств на основе светодиодов,  $\mathcal{Y}_{ЛН}$  и  $\mathcal{Y}_{СИД}$  – стоимость утилизации действующих устройств и устройств на основе светодиодов,  $K_{СИД}$  – капитальные расходы устройств на основе светодиодов.

Капитальные расходы  $K_{СИД}$  в общем случае являются функцией времени, прошедшего со дня производства подвижного состава до его модернизации, что означает увеличение стоимости модернизации эксплуатируемого подвижного состава за счет увеличения капитальных расходов, связанных с «устареванием» самого подвижного состава  $K_{ПС}$  и его элементов:

$$K_{СИД} = f(t) = K_{СИД0} + K_{ПС} \cdot t, \quad (3.29)$$

где  $K_{СИД0}$  – капитальные расходы которые несет потребитель при отсутствии необходимости нести капитальные расходы на модернизацию подвижного состава.

Эксплуатационные расходы  $\mathcal{E}_{СИД}$  и  $\mathcal{E}_{ЛН}$  в общем случае зависят от стоимости запасных частей  $C_{ЗЧ}$ , потребляемой мощности  $C_{кВт}$ , частоты и затрат на неплановое обслуживание  $C_{НТО}$ , частоты и затрат на плановое обслуживание  $C_{ТО}$ , а также времени  $t$ :

$$\mathcal{E} = f(C_{ЗЧ}, C_{кВт}, C_{ТО}, C_{НТО}, t), \quad (3.30)$$

Для уменьшения эксплуатационных расходов необходимо уменьшать потребляемую мощность, увеличивать межремонтный интервал.

При сравнении двух вариантов производства новых локомотивов, например, при новой серии подвижного состава или модернизации существующей серии: со светотехникой на основе ламп накаливания и со светотехникой на основе светодиодов и при выполнении равенства (3.28), то экономическая эффективность будет выражается уравнением

$$\delta_{\text{эк}} = \frac{\sum_{i=1}^m (K_{ЛНi} + \mathcal{E}_{ЛНi} + Y_{ЛНi})}{\sum_{i=1}^m (K_{СИДi} + \mathcal{E}_{СИДi} + Y_{СИДi})}, \quad (3.31)$$

где  $K_{ЛН}$  – капитальные расходы устройств на основе ламп накаливания.

Следует учитывать, что равенство (3.28) на практике выполняется не всегда. Например, при разработке изделий общего освещения или сигнальных устройств локомотива несколько устройств на основе ламп накаливания могут быть заменены одним устройством на основе светодиодов. Таким образом, следует рассматривать следующую ситуацию:

$$m_{ЛН} \neq m_{СИД} \quad (3.32)$$

Тогда экономическая эффективность замены устройств на основе ламп накаливания на устройства на основе светодиодов выражается следующим уравнением:

$$\delta_{\text{эк}} = \frac{\sum_{i=1}^{m_{\text{ЛН}}} n_i (\mathcal{E}_{\text{ЛН}i} + Y_{\text{ЛН}i})}{\sum_{i=1}^{m_{\text{СИД}}} (K_{\text{СИД}i} + \mathcal{E}_{\text{СИД}i} + Y_{\text{СИД}i})}, \quad (3.33)$$

где коэффициент

$$n_i = \frac{l_{\text{ЛН}}}{l_{\text{СИД}}} \quad (3.34)$$

определяет сокращение/увеличение числа светотехнического оборудования одного применения при замене устройств на основе ламп накаливания на устройства на основе светодиодов. Наиболее ярко этот коэффициент проявится при модернизации освещения внутренних помещений локомотива.

Для новых локомотивов экономическая эффективность от использования определяется следующим образом

$$\delta_{\text{эк}} = \frac{\sum_{i=1}^{m_{\text{ЛН}}} n_i (K_{\text{ЛН}i} + \mathcal{E}_{\text{ЛН}i} + Y_{\text{ЛН}i})}{\sum_{i=1}^{m_{\text{СИД}}} (K_{\text{СИД}i} + \mathcal{E}_{\text{СИД}i} + Y_{\text{СИД}i})}, \quad (3.35)$$

где коэффициент  $n_i$  находится исходя из расчета количества тех или иных устройств основываясь на дизайн-проекте подвижного состава.

Таким образом, экономический выигрыш от внедрения светотехники на основе светодиодов будет при выполнении неравенства  $\delta_{\text{эк}} > 1$ .

Очевидно, что  $\delta_{\text{эк}}$  при возрастании значений  $\sum_{i=1}^m (K_{\text{ЛН}i} + \mathcal{E}_{\text{ЛН}i} + Y_{\text{ЛН}i})$  и  $\sum_{i=1}^m (\mathcal{E}_{\text{ЛН}i} + Y_{\text{ЛН}i})$  также возрастает. Это значит, что при значительном превышении эксплуатационных расходов  $\mathcal{E}_{\text{ЛН}}$  над  $\mathcal{E}_{\text{СИД}}$  и при незначительной разности  $K_{\text{ЛН}}$  с  $K_{\text{СИД}}$ , а также  $Y_{\text{ЛН}}$  с  $Y_{\text{СИД}}$  будет обеспечиваться экономическая эффективность применения светодиодов в светотехнической аппаратуре подвижного состава железной дороги. Кроме того, для повышения экономической эффективности коэффициент  $n_i$  должен быть больше 1.

Между  $\delta_{эк}$  и  $K_{сидi} + Э_{сидi} + У_{сидi}$  существует обратно пропорциональная зависимость, что, обуславливает рациональность замены устройств на основе ламп накаливания на устройства на основе светодиодов при уменьшении капитальных вложений на установку светодиодной аппаратуры и на модернизацию подвижного состава.

Всего на сеть дорог АО «РЖД» предприятием АО ФГУП НПО Автоматики поставлено в опытную эксплуатацию около 300 светодиодных прожекторов. Опытная эксплуатация проводится на следующих моделях электровозов и тепловозов: 2ЭС10, ТЭ8, 2ЭС7, ТЭМ9Н, ГТ1h, ТЭМ2, ТГМ4Б.

### 3.4 Выводы по главе

1. При разработке лобового прожектора для локомотива на основе светодиодов необходимо использовать кристаллы синего спектра свечения минимальных габаритов, покрытые люминофором для получения белого света.
2. Наиболее подходящим типом оптики для формирования узкого пучка света является решение на основе линзы.
3. При разработке узкоградусной оптики необходимо использовать линзы сложной формы на основе ПММА.
4. Для фокусирования центральной части излучения СТ при малых углах наиболее подходящей является сферическая линза.
5. Сферическая линза в малых углах охвата не оказывает значительного влияния на увеличение потерь светового потока.
6. Для фокусирования боковой части излучения СТ наиболее подходящим является параболоид.

7. Необходимо находить определенный оптимум геометрических размеров линзы к ее осевой силе света. Лучше всего это отношение у невысоких линз с малым параметром параболы.

8. При разработке оптического элемента необходимо учитывать потери света на отражение и поглощение в нем.

9. При малых размерах оптики и правильном выборе материала линзы потери света на поглощение в материале малы.

10. При разработке прожектора необходимо учитывать условия в реальной эксплуатации: тепловой режим в нише, потери на защитное стекло и т.п.

11. Использование светодиодов в качестве СТ лобового прожектора повышает безопасность движения подвижного состава, а также уменьшает эксплуатационные затраты на поддержание локомотивного парка в работоспособности [114].

## Глава 4. Инновационные возможности использования светодиодной техники на локомотивах

### 4.1. Анализ вопросов безопасности при движении локомотива в кривых

Для достижения номинальной силы света и угла рассеивания в вертикальной и горизонтальной плоскостях по уровню  $I_{0,1}$   $\alpha=3^\circ$  ГОСТом [36] регламентируется метод фокусировки лобового прожектора на основе ламп накаливания.

Обычно для удобства обслуживания в эксплуатации лобовой прожектор устанавливается в верхней части кабины машиниста по ее оси - выше лобового окна кабины, таким образом, чтобы имелась возможность его регулировки из кабины машиниста. Согласно [77], наиболее высоко прожектор будет установлен для габарита Т, где центр светового тела прожектора будет установлен на высоте около 4500 мм относительно головки рельса, наиболее низко прожектор устанавливается на локомотивах габарита 1-ВМ, 0-ВМ, где высота его центра обычно около 3000мм. Расстояние, на котором световой пучок лампового прожектора достигнет головки рельса в общем случае является функцией высоты установки прожектора, и ее можно оценить по формуле:

$$L(h) = \frac{h}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}, \quad (4.1)$$

где  $h$  – высота центра светового тела прожектора относительно головки рельса, м;  
 $\alpha$  – угол расхождения луча прожектора, градус.

Таким образом, для прожектора с лампой накаливания и локомотива габарита Т, бригада машинистов сможет видеть головку рельса на расстоянии более  $L = 172$ м, при этом диаметр светового пучка достигнет 9 м. Для габарита 0-ВМ бригада

машинистов сможет видеть головку рельса на расстоянии более  $L = 114$  м при этом диаметр светового пучка достигнет 6 м. Некоторые машинисты искусственно наклоняют свет от прожектора вниз, чтобы лучше видеть линию пути, однако не все конструкции и кабины машиниста, и прожекторов позволяют это делать.

Согласно [77], расстояние между осями смежных путей для линий со скоростью движения до  $v = 120$  км/ч равно 5300 мм. Это означает, что встречная локомотивная бригада будет ослепляться лобовым прожектором на расстоянии более:

$$L(n) = \frac{m-n}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}, \quad (4.2)$$

где  $m = 5,3$  м – расстояние между осями смежных путей,  $n$  – половина ширины габарита подвижного состава, м,  $\alpha$  – угол расхождения света прожектора, градус.

Таким образом, на прямом участке пути локомотивный прожектор на основе лампы накаливания не является безопасным так как ослепляет встречную локомотивную бригаду до очень малого расстояния до локомотива и эффективно подсвечивает головку рельса пути, по которому идет локомотив на слишком большом расстоянии от локомотива, что может быть опасно так как машинист не сможет отреагировать на объект, появившийся перед локомотивом.

Известно, что неравномерность освещения повышает утомляемость оператора (машиниста) и создает проблемы при адаптации, снижая остроту зрения [115]. Таким образом, для обеспечения оптимального освещения пути перед локомотивом необходимо рассчитать с какого расстояния машинист может физически видеть пути и необходимую силу света для данного направления.

Для оценки минимального угла, под которым может быть видно полотно железной дороги (высокий машинист стоит) следует воспользоваться формулой:

$$L(H) = \frac{Hl}{h_m - h_c}, \quad (4.3)$$

где  $l = 600$  мм, минимальное расстояние от глаз машиниста до лобового стекла,  $h_m = 1775$  мм, - высота глаз машиниста (относительно пола кабины) ростом 1900 мм,

$h_c = 1050$  мм, минимальная высота нижней кромки стекла (относительно пола кабины;  $H$  - высота нижней кромки стекла относительно головки рельса, зависящая от габарита подвижного состава.

Соответственно с этого расстояния необходимо подсвечивать путь такой силой света, чтобы освещенность участков была на уровне значений освещенности в кабине машиниста.

Для того, чтобы оценить расстояние, на котором машинист должен различить препятствие используем тот факт, что путевого рабочего не должны находиться на пути при приближающемся поезде, если расстояние от них до поезда составляет  $L=400$  м и менее [116]. На таком расстоянии при прямом участке пути прожектор локомотива создаст освещенность, которую можно оценить по формуле.

$$\Omega = \frac{I_0}{L^2}, \quad (4.4)$$

где  $I_0$  - максимальная по ГОСТ осевая сила света прожектора, Кд;  $L$  -, расстояние до локомотива, м. Результат выражения (4.4), соответствует уровням освещенности от местного освещения в кабине [32-35] машиниста локомотива, которое в основном и используется машинистами во время движения ночью. Таким образом, вдоль профиля пути необходимо обеспечить освещенность  $\Omega = 6$  Лк, для обеспечения минимального утомления глаз машиниста. Тогда кривая силы света (КСС) в вертикальной плоскости можно рассчитать по формуле.

$$I(\alpha) = \frac{\Omega h^2}{\sin(\alpha)^2}, \quad (4.5)$$

где  $h$  – высота центра прожектора относительно головки рельса, м;  $\alpha$  – угол падения света от оси прожектора, градус.

Следует учитывать, что выражение (4.5) имеет вид функционала, который не может описать поведение силы света в углах близких к нулю. Для описания поведения осевой силы света в этих углах потребуются дополнительное исследование.

Результаты расчета приведены для габарита Т на графике рисунка 4.1 (результаты расчета приведены в виде полярных координат), угол  $I_{0.5} = 1.74$  градусов,  $I_{0.1} = 3.9$  градусов.

Во время движения локомотив может двигаться не только по прямым участкам пути, но и по кривым участкам с различным радиусом кривизны, при этом доля кривых на магистралях может достигать 30% от общей протяженности пути [117]. Согласно [118], радиусы кривизны на железной дороге различны и, в целом, зависят от категории линии. При анализе эффективности работы прожектора локомотива на кривом участке пути необходимо помимо радиуса кривизны участка знать и его продолжительность, которая в общем случае не регламентируется. Кроме того, на путях существуют переходные кривые, которые используются для сопряжения кривых путей различных радиусов и прямых путей между собой, их радиус и длина четко регламентирована в СТН Ц-01-95 [118].

При движении локомотивной бригаде для сохранения безопасности движения необходимо видеть то, что происходит непосредственно на путях и вокруг них, однако на кривых участках пути головка рельса уходит в сторону и не может быть эффективно подсвечена стандартным прожектором.

Длина кривой части пути, которая находится под лучом прожектора, и может быть им подсвечена зависит от радиуса кривой и оценивается из соотношения (см. рисунок 4.2):

$$L(R) = \frac{\pi R \alpha}{180^\circ}, \quad (4.6)$$

где  $R$  – радиус кривизны пути, м

Результаты расчетов подсвеченной длины пути приведены в таблице 4.1.

Если проанализировать данные таблице 4.1 совместно с результатами вычисления (4.1), то получится, что лобовой прожектор освещает небольшой участок пути на кривых радиусом 4 и 3 км, в остальных случаях путь подсвечивается незначительно за счет несфокусированного света прожектора и работу буферных фонарей (см. рисунок 4.3), что негативно сказывается на безопасности движения.

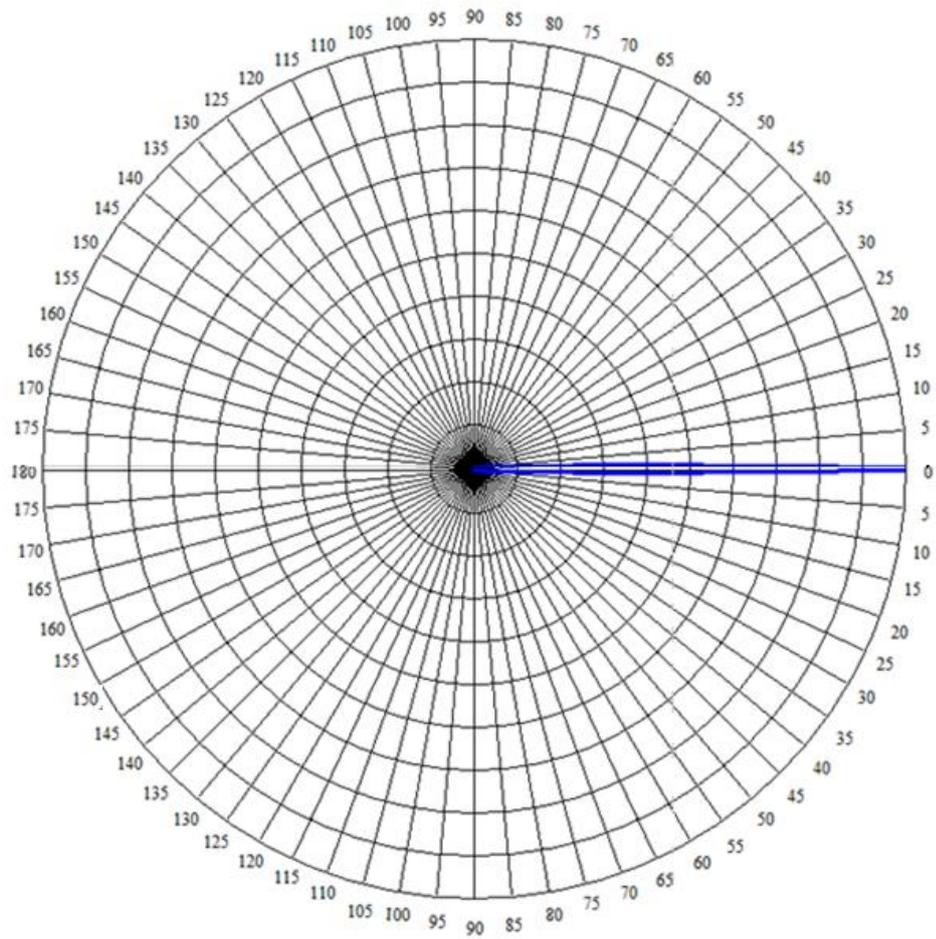


Рисунок 4.1 - Предлагаемая КСС прожектора в вертикальной плоскости

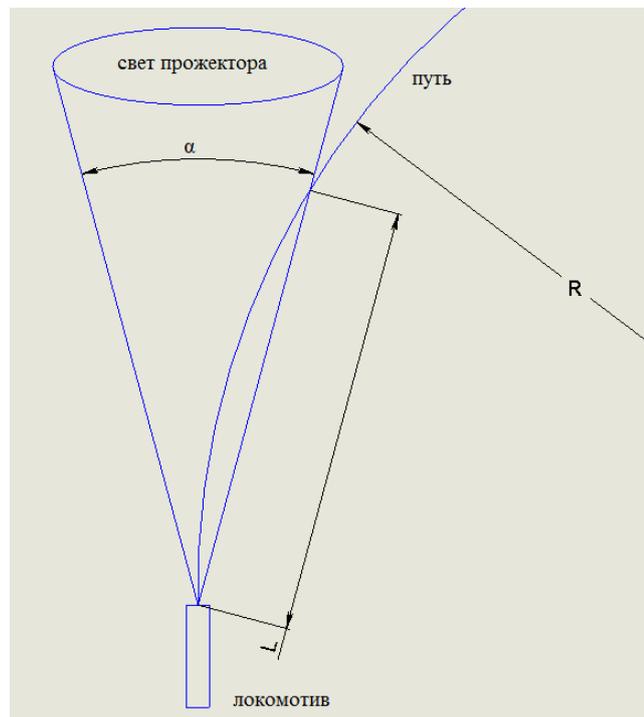


Рисунок 4.2 - Пояснение к расчету видимости пути при повороте



Рисунок 4.3 - Вид из кабины машиниста ночью при стандартном лобовом прожекторе

Наибольшие сложности возникают с обеспечением эффективной подсветки пути при кривых малого радиуса. Так как длина кривых пути не регламентируется, то они могут быть и круговыми, а увеличение угла распространения света локомотивного прожектора при сохранении осевой силы света потребует значительно большей мощности лампы накаливания. При прохождении кривых наименьшего радиуса прожектор должен обеспечивать возможность подсветки пути на том же уровне, как и путь перед собой. Согласно выражению (4.7), можно представить требуемую кривую силы света в плоскости до угла в 45 градусов. После угла в 45 градусов большая сила света в боковом направлении нецелесообразна. Излучение прожектора в углах 45-90 градусов в большинстве ситуаций будет подсвечивать лесные насаждения, который находится параллельно пути. Расстояние от локомотива до насаждений можно принять 20 м [119].

$$\left\{ \begin{array}{l} I(\varphi) = \frac{\Omega L_1^2}{\cos(\varphi)^2}, \quad \varphi \in [-45, +45] \\ I(\varphi) = \frac{\Omega L_2^2}{\sin(\varphi)^2}, \quad \varphi \notin [-45, +45] \end{array} \right. \quad (4.7)$$

где  $L_2$  – расстояние от подвижного состава до насаждений, м;  $L_1$  – расстояние от подвижного состава до препятствия, 400м.

Результаты расчета выражения (4.7) приведены на рисунке 4.4, построенном в полярной системе координат.

Таблица 4.1 - Результаты расчета по формуле (4.6)

Радиус кривизны пути, м	Подсвеченный путь, м
4000	209,43
3000	157,08
2500	130,90
2000	104,72
1800	94,25
1500	78,54
1200	62,83
1000	52,36
800	41,89
700	36,65
600	31,42
500	26,18
400	20,94
350	18,33
300	15,71
250	13,09
200	10,47

В современных локомотивах в последнее время в качестве источника света для прожектора используют светодиоды, а сам прибор представляет собой распределенную систему на основе единичных светодиодов или светодиодных модулей [72]. Благодаря этому становится принципиально возможно обеспечить практически любую кривую силы света для лобового прожектора.

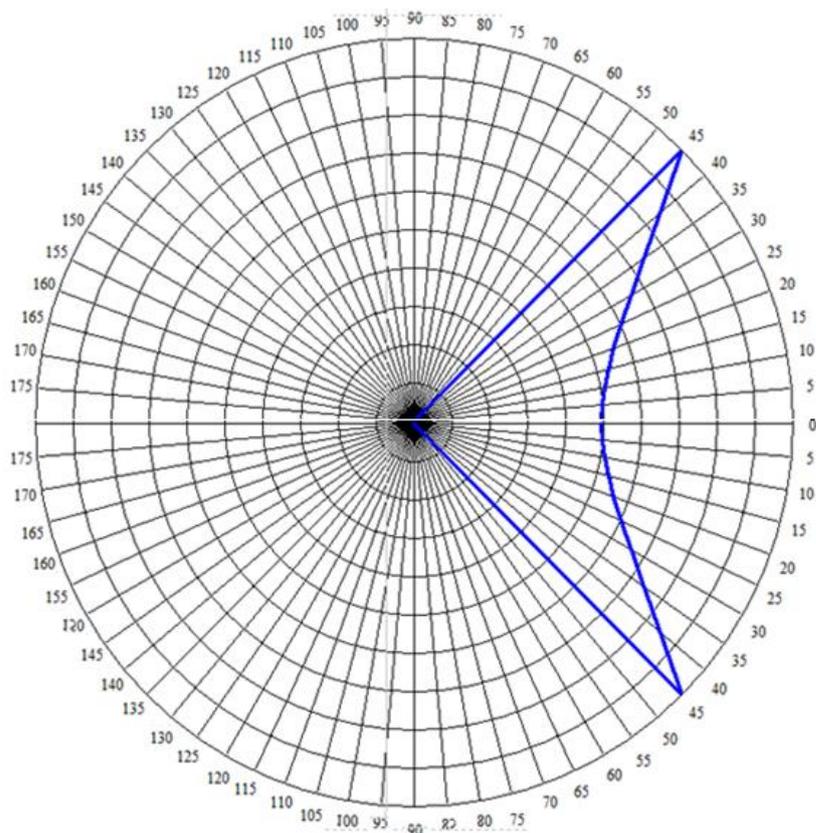


Рисунок 4.4 - Предлагаемая КСС прожектора в горизонтальной плоскости

Локомотив с предложенной КСС лобового прожектора будет ослеплять встречную локомотивную бригаду, что негативно повлияет на безопасность движения. Для предотвращения ослепления нужно, чтобы встречный локомотив не попадал в КСС прожектора. Для этого необходимо определить угол, под которым будет видна кабина машиниста встречного локомотива (см. рисунок 4.5). Из рисунка видно, что угол под которым видно встречную кабину зависит от расстояния до нее, при этом он будет тем меньше чем больше расстояние между кабинами.

$$\gamma(L) = \arctan\left(\frac{n+m}{L}\right) - \arctan\left(\frac{m-n}{L}\right), \quad (4.8)$$

где  $m$  – расстояние между осями путей, м;  $n$  – половина ширины габарита подвижного состава, м.

Таким образом, необходимо исключить сектор из КСС в горизонтальной плоскости как минимум в 0,5 градусов при расстоянии между локомотивами в 400м.

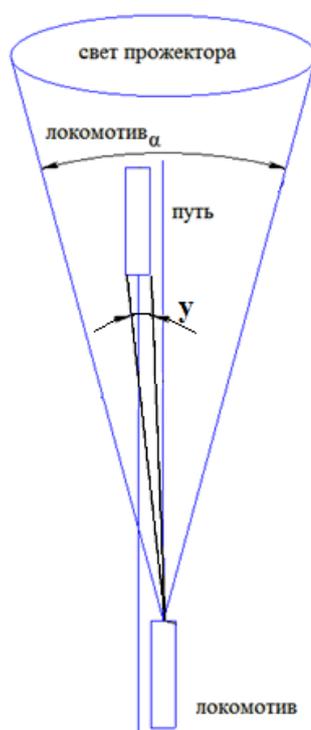


Рисунок 4.5 - Пояснение к расчету предотвращения ослепления встречной бригады

Существуют различные технические решения для динамического изменения кривой силы света светильников [120-122], все они основаны на электромеханических компонентах. Применяя светодиоды в качестве источника света можно изменять направление излучения всего прибора подключая и отключая единичные светодиоды и модули, без применения известных электромеханических компонентов.

Следует отметить, что для выделения из КСС угла в 0,5 градусов нужна узкоградусная оптика, а это накладывает жесткие требования на конструкцию оптической системы. Кроме того, в данном случае, из-за малого угла расхождения, световой пучок не будет сформирован на расстоянии  $L = 400$  м, т.е. сила света прибора не достигнет необходимых значений - не будет получен нужный уровень освещенности перед локомотивом.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что эффективным будет использование узкоградусной оптики способной сформировать световой поток прожектора на расстоянии  $L = 10 - 20$  м от локомотива и изменение кривой силы света для горизонтальной плоскости в больших углах, чем показывает решение выражения (4.8). Физически это приведет к тому, что достаточно большая часть освещаемого пространства вокруг кабины встречного локомотива будет не освещена или освещена слабо. Однако, пространство непосредственно около кабины встречного локомотива может нести опасность непосредственно только этому локомотиву, и должно освещаться и контролироваться силами встречного локомотива.

#### **4.2. Разработка и исследование прожектора локомотива с функцией изменяемой диаграммы направленности**

Вопрос безопасного движения поезда в ночное время суток является важным и актуальным. Стандартный прожектор освещает только впереди лежащий прямолинейный участок пути. Начиная с 70-х годов XX века, конструкторы отрасли автомобилестроения стали предлагать различные варианты адаптивной оптики для автомобиля. Основная задача данной оптики заключалась в изменении ДН при изменении поведения автомобиля. Такие фары более эффективно

освещают дорожное полотно при повороте автомобиля, полноценно освещают тротуар в условиях городского движения и предотвращают ослепление водителя встречного автомобиля. Оптика чаще всего построена на основе ксенона и состоит из одного или нескольких сегментов с подвижными элементами. Принцип действия данной системы основан на получении информации о скорости автомобиля, угле поворота рулевого колеса и еще нескольких датчиков. Получив информацию от систем автомобиля, система принимает решение о необходимости изменения положения оптических элементов друг относительно друга при помощи набора шаговых двигателей. Известно, что электромеханические компоненты являются одними из самых низко надежных элементов [123]. Поэтому, при движении может возникнуть ситуация, когда фары заклинить в одном из положений. Одна из последних разработок в этом направлении - разработки фирмы «Ауди», которая называется Audi Matrix LED. Ее принципиальное отличие от предыдущих разработок в том, что применяется матрица из 25 светодиодов, разбитая на 5 групп по 5 светодиодов. Каждая группа имеет собственную оптическую систему со своим управлением. Несмотря на наличие электромеханических компонентов, применение такой системы принципиально увеличивает надежность адаптивной оптики автомобиля.

Для железной дороги прожектор является особо ответственным изделием, отвечающим за безопасность. Применение потенциально ненадежных элементов недопустимо – использование каких-либо поворотных механизмов неприемлемо. Принципиально возможно разработать прожектор с функцией изменяемой диаграммы направленности, применяя матричный метод организации КСС: каждая часть прожектора формирует определенную часть КСС.

Указанная цель достигается тем, что в прожектор локомотива введены дополнительные световые излучатели, выполняющие функции  $N$  прожекторов, поочередное включение и выключение которых осуществляется в зависимости от информации по продольному профилю впереди лежащего пути, получаемых от базы данных, имеющейся на локомотиве и в результате определения точки расположения локомотива по спутниковой связи.

На рисунке 4.6 приведена схема прожектора локомотива железнодорожного транспорта [124].

Сущность изделия заключается в том, что в устройство введены модем GPS/ГЛОНАСС, блок базы данных и излучатели светового потока, выходами подключенных выходами блока управления, а выход модема GPS соединен с входом блока базы данных, причем направления излучения светового потока различны и образуют требуемую область излучений светового потока по условиям движения локомотива в кривых участках пути. В устройство введен фотоприемник, направленный в сторону движения локомотива, его задача заключается в фиксации окружающей локомотив обстановки.

Таким образом, данное техническое решение позволяет получить подсветку окружающего локомотив пространства в широком угле, не ослепляя встречную локомотивную бригаду.

Для практической реализации предложенного прожектора с переменной ДН, анализ которой выполнен в предыдущем разделе, воспользуемся следующими допущениями.

1) Используются осесимметричные линзы с глубокой ДН, это допущение необходимо для исключения возможности неправильной установки линз при сборке изделия и упрощения их геометрии;

2) Прожектор рассматривается как система разноориентированных оптических элементов, которые соосны в вертикальной плоскости и направлены параллельно пути, это допущение необходимо для упрощения расчетов и геометрии профиля конечного изделия, что позволит изготавливать его по более простой технологии, например, экструзией.

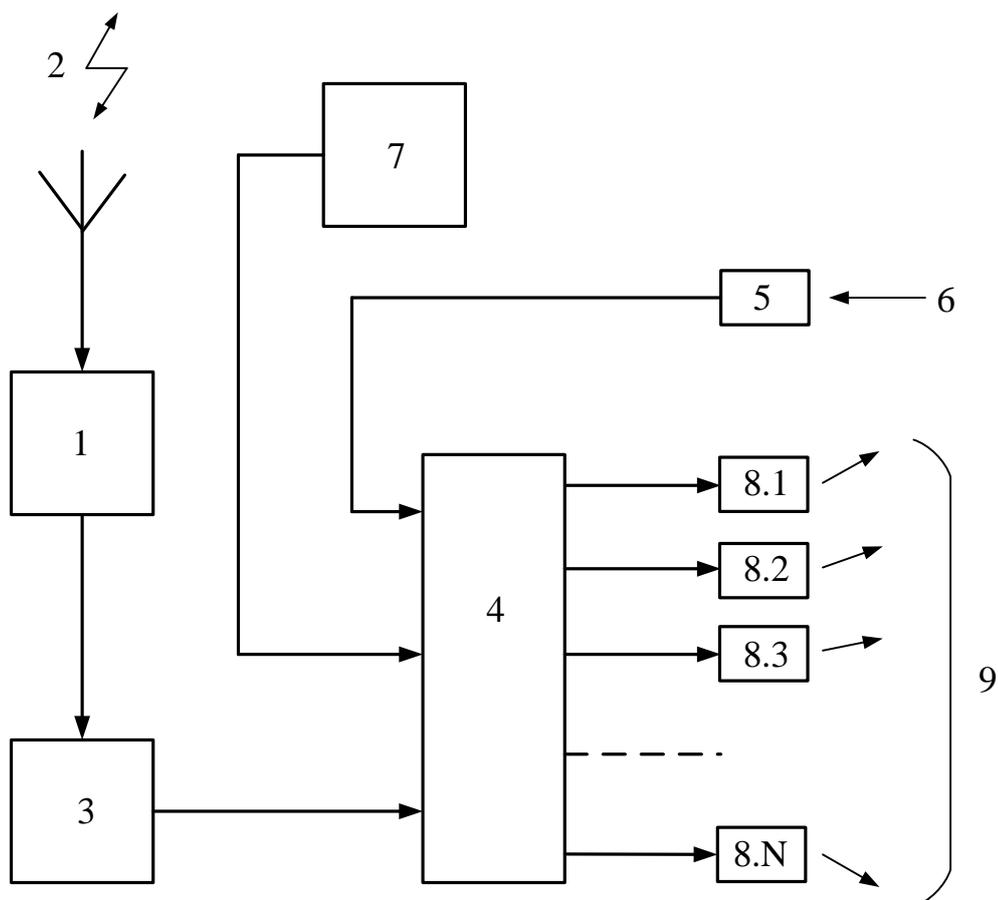
При проектировании и расчете ДН будет использоваться тот факт, что силу света от нескольких СТ можно складывать если они имеют одно и тоже направление и находятся в одной точке [125, 126].

Каждое СТ имеет светораспределение согласно своей системы координат, для расчета системы СТ необходимо выбрать общую систему координат, и

совместить частные системы с ней путем поворота частных систем на определенный угол [126]. Для двумерного случая это будет:

$$I(\varphi) = I_1(\varphi - \varphi_1) + \dots + I_n(\varphi - \varphi_n), \quad (4.9)$$

где  $I(\varphi)$  – распределение силы света системы СТ, Кд;  $I_i$  – силы света отдельных СТ, Кд;  $\varphi_i$  – углы поворота частных систем координат относительно общей системы.



1 - GPS/ГЛОНАСС модем, 2 - канал радиосвязи, 3 - блок базы данных, 4 - блок управления, 5 - фотоприемник, 6 - излучение от встречного локомотива, 7 - блок ручного управления прожектором 8.1 - 8.N - излучатели светового потока, освещающих впереди лежащий участок железнодорожного пути, 9 – пространство перед локомотивом.

Рисунок 4.6 - Функциональная схема прожектора

Согласно выражениям (4.4), (4.5), (4.7), (4.9), КСС системы может быть описана при помощи системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} I(\varphi) = \frac{I_0}{[\cos(\varphi)]^2} = \frac{m_1 \Omega h^2}{[\sin(\varphi - \varphi_1)]^2} + \dots + \\ + \frac{m_n \Omega h^2}{[\sin(\varphi - \varphi_n)]^2}, \quad \varphi \in [-45, +45] \\ \\ I(\varphi) = \frac{\Omega L_2^2}{\sin(\varphi)^2}, \quad \varphi \notin [-45, +45] \end{array} \right. \quad (4.10)$$

где  $I_0$  – осевая сила света прожектора, 960 кКд;  $h$  – высота центра прожектора относительно головки рельса, м;  $m_i$  – весовой коэффициент модуля в системе,  $L_2$  – расстояние от локомотива до лесных насаждений, м.

С учетом допущения об осевой симметрии устройства можно записать:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{I}(\varphi) = \frac{I_0}{[\cos(\varphi)]^2} = \Omega h^2 \left[ m_1 \left( \frac{1}{[\sin(\varphi - \varphi_1)]^2} + \frac{1}{[\sin(\varphi - \varphi_n)]^2} \right) + \right. \\ \left. + m_{0,5n} \left( \frac{1}{[\sin(\varphi - \varphi_2)]^2} + \frac{1}{[\sin(\varphi - \varphi_{n-1})]^2} \right) + \dots \right], \quad \varphi \in [-45, +45] \\ \\ I(\varphi) = \frac{\Omega L_2^2}{\sin(\varphi)^2}, \quad \varphi \notin [-45, +45] \end{array} \right. \quad (4.11)$$

Неизвестными в этой системе являются параметры  $\varphi_i$  и  $m_i$ . Очевидна связь между ними: чем меньше шаг по углу между линзами, тем меньше разница в весовом коэффициенте соседних световых элементов и тем больше стоимость готового изделия. Минимальный шаг между соседними элементами зависит от геометрических размеров линз, который определяется яркостью СИД. Максимальный шаг между соседними элементами зависит от угла, на котором происходит уменьшение силы света в два раза, который определяется отношением геометрических размеров СИД и оптики.

Произведем оценку мощности потребления предложенного устройства. В общем случае световой поток  $\Phi$  рассчитывается следующим образом.

$$\Phi = \int_{c=0}^{2\pi} \int_{\gamma=0}^{\pi} I(c, \gamma) dc d\gamma \quad (4.12)$$

Прожектор является набором отдельных световых модулей с круглосимметричным светораспределением.

$$\Phi = \sum_{i=1}^n \Phi_i \quad (4.13)$$

$$\Phi_i = 4\pi \int_{\varphi=0}^{\pi/2} I(\varphi) \sin(\varphi) d\varphi \quad (4.14)$$

$$\Phi_i = 4\pi \int_{\varphi=0}^{\pi/2} \frac{\Omega h^2 d\varphi}{\sin(\varphi)} \quad (4.15)$$

Из курса математического анализа известно.

$$\int \frac{dx}{\sin(x)} = \ln \left| \operatorname{tg} \left( \frac{x}{2} \right) \right| \quad [127] \quad (4.16)$$

Выражение (4.5) справедливо только при  $\varphi \geq 0,011$  рад. Пучок излучения внутри этого угла имеет силу света 960кКд.

$$\Phi_i = 4\pi(\Omega h^2 (-\ln \left| \operatorname{tg} \left( \frac{0,011}{2} \right) \right| + 960 \cdot 10^3 \cdot 0,011)) \text{ Лм} \quad (4.17)$$

Выражение (4.15) показывает, что основная мощность пучка находится внутри угла 0,022 рад. На расстоянии  $L = 400$  м для габарита  $\Gamma$  конус с этим линейным углом имеет световое пятно диаметром 9 метров, что примерно равно высоте двух локомотивов. В целом, это является избыточным и требует больших затрат светового потока. В связи с этим необходимо пересмотреть КСС для углов при которых сила света больше 50% от осевой. Рассмотрим систему уравнений (4.18) и найдем требуемый световой поток для нее.

$$\left\{ \begin{array}{ll} I(\varphi) = \frac{\Omega h^2}{\sin(\varphi)^2} & \varphi \notin [0; 0,87] \\ I(\varphi) = 960 \cdot 10^3 \cos(68,97\varphi) & \varphi \in [0; 0,87] \end{array} \right. \quad (4.18)$$

$$\Phi_i = 4\pi \left( \int_{\varphi=0.0152}^{\pi/2} \frac{\Omega h^2 d\varphi}{\sin(\varphi)} + 960 \cdot 10^3 \int_0^{\varphi=0.0152} \cos(68.97\varphi) \sin(\varphi) d\varphi \right) \quad (4.19)$$

В результате решения выражения (4.19) получим, что  $\Phi=7.836$  кЛм. Это соответствует световому потоку стандартного прожектора, что говорит о том, что выражение (4.18) оптимально описывает модуль предлагаемого прожектора [38].

Световой поток современных светодиодов в корпусе 3535 достигает  $E_{eff}=168$  Лм/Вт [128]. Это говорит о том, что потребляемая мощность одного модуля без учета КПД питающего источника будет около  $P=47$  Вт. Если прожектор будет состоять из 46 модулей (2 градуса между модулями), то мощность всего прожектора согласно выражению (4.11) будет равна  $P=1.4$  кВт. Если снизить осевую силу света, например, до  $I_0=750$  кКд (на 22%), что разрешено нормами безопасности, то максимальная потребляемая мощность снизится до  $P=1,1$  кВт.

На практике представленные на рисунках 4.1 и 4.4 КСС будет использоваться относительно редко и в течении короткого промежутка времени, например, при проезде переезда. На практике наиболее часто встречающиеся кривы пути радиусом более  $R=450$  м [129]. Согласно выражению (4.6) угол для эффективного освещения пути длиной  $L=400$  м должен быть равен или более 50,93 градусов. Учитывая то, что машинисту необходимо подсвечивать только ту область пути, в которую идет поворот, то половину луча можно отключить. Потребляемая мощность при осевой силе света  $I_0=960$  кКд в этом случае составит  $P=650$  Вт без учета КПД преобразователя, что соответствует потребляемой мощности от лампового прожектора. Несмотря на то, что прожектор будет работать в предельных режимах непродолжительное время, необходимо обеспечить оптимальное для предельного режима работы охлаждение.

### 4.3. Варианты реализации системы управления шириной луча прожектора

При разработке управляемого прожектора необходимо определить способ, благодаря которому система будет отслеживать необходимую для безопасного движения ширину луча. Для определения ширины луча система должна определить радиус кривой движения и наличие встречного локомотива.

Для управления шириной пучка принципиально можно использовать несколько способов.

- использовать спутниковую привязку локомотива к графу дорог,
- использовать систему видеонаблюдения, которая направлена вдоль пути следования состава,
- использовать информацию от элементов ЕКС, расположенные вдоль пути следования состава.

Использование спутниковой привязки к графу дорог, требует возможности связи спутника для геопозиционирования, а также создания графа железнодорожного полотна.

Граф дорог – это цифровая векторная карта, состоящая из связанных дуг и узлов, местоположение и свойства которых с заданной точностью и полнотой передают маршруты и организацию движения транспорта.

Граф дорог содержит два основных типа объектов – дуги и узлы.

Дуги графа можно построить по линиям железнодорожного пути дорог, с обеспечением топологии в точках примыкания. Узлы могут последовательно соединять две дуги, имеющие разные характеристики, или соединять несколько дуг в местах перекрестков, развилок и т.п.

Для учета радиуса кривизны пути при регулировке угла света прожектора можно использовать привязку положения подвижного состава, полученного средствами GPS позиционирования, к графу железнодорожного полотна.

Известно, что существует погрешность определения положения движущегося объекта на треке. Эту погрешность можно оценить следующим образом [130].

$$\delta = \delta_{НС} + \delta_{ТР} + \delta_{АП} + \delta_{ЛР}, \quad (4.20)$$

где  $\delta_{НС}$  – погрешность формирования шкалы времени на спутнике,  $\delta_{ТР}$  – погрешность, возникающая при прохождении сигнала до потребителя,  $\delta_{АП}$  – погрешность аппаратуры потребителя,  $\delta_{ЛР}$  – прочие случайные погрешности.

Погрешности  $\delta_{НС}$  возникают вследствие несовершенства процедур сверки и хранения бортовой шкалы времени. Они проявляются в смещении фаз излучаемых дальномерных кодов и меток времени, что приводит к погрешностям измерения расстояния до спутника и расчета его координат.

Погрешность  $\delta_{ТР}$  проявляется в дополнительных задержках сигнала, возникающих из-за искривления трассы распространения радиоволн при прохождении различных слоев атмосферы Земли.

К  $\delta_{АП}$  относят погрешности слежения за моментом прихода сигнала спутника в аппаратуре потребителя.

Суммарная погрешность определения положения, вызванная описанными выше причинами, составляет порядка  $\delta=10$  м, однако существует отключенная погрешность  $\delta_{СЕЛ}$  – погрешность селективного доступа, отключенная по приказу президента США 02 мая 2000г. [131], погрешность определения положения при наличии этой погрешности достигает  $\delta_{СЕЛ} = 100$  м.

Очередная погрешность, влияющая на погрешность определения положения: положение спутников друг к другу с точки зрения приемника. При определенных видах расположения приемника и спутников эта погрешность может достигать до  $\delta = 150$  м.

Уровень погрешностей, позволяет сделать вывод о том, что система управления на основе спутниковой навигации может давать существенную погрешность в определении местонахождения подвижного состава и может эффективно использоваться только на протяженных участках пути.

На основе описанных выше погрешностей определения положения, можно оценить погрешность установления угла прожектора, который необходимо выключать для исключения ослепления встречной бригады.

В общем случае максимальную погрешность определения угла установки можно рассчитать по формуле:

$$\Delta\gamma(L_1, L_2) = \gamma(L_1) - \gamma(L_2), \quad (4.21)$$

где  $L_1, L_2$  – минимальное и максимальное расстояния между локомотивами в условиях расчета их положения на путях, м.

Для прямого участка пути выражение (4.21) примет вид.

$$\begin{aligned} \gamma(L_1, L_2) = & \arctan\left(\frac{n+m}{L_1}\right) - \arctan\left(\frac{m-n}{L_1}\right) - \\ & - \arctan\left(\frac{n+m}{L_2}\right) + \arctan\left(\frac{m-n}{L_2}\right), \end{aligned} \quad (4.22)$$

где  $m$  – расстояние между осями путей,  $n$  – половина ширины габарита подвижного состава, м.

Для кривых выражение (4.21) примет вид (см. рисунок 4.7).

$$\begin{aligned} \gamma(L_1, L_2) = & \arctan\left(\frac{n+m}{2R \sin\left(\frac{L_{d1}}{2R}\right)}\right) - \arctan\left(\frac{m-n}{2R \sin\left(\frac{L_{d1}}{2R}\right)}\right) - \\ & - \arctan\left(\frac{n+m}{2R \sin\left(\frac{L_{d2}}{2R}\right)}\right) + \arctan\left(\frac{m-n}{2R \sin\left(\frac{L_{d2}}{2R}\right)}\right), \end{aligned} \quad (4.23)$$

где  $R$  – радиус кривой, м;  $n$  – половина ширины габарита подвижного состава, м;  $L_d$  – расстояние между встречными подвижными составами, если бы они двигались по одной дуге, м.

На основании приведенных утверждений и расчетов, можно сделать вывод о том, что использование спутниковой навигации в качестве единственного способа определения необходимой ширины пучка света нецелесообразно из-за малой точности.

Использование системы видеонаблюдения приводит к необходимости введения нового элемента в систему безопасности – системы видеонаблюдения, что повышает капитальные и эксплуатационные расходы.

Система видеонаблюдения должна работать круглосуточно и при любых погодных условиях [132].

Система должна обеспечивать непрерывное наблюдение за путями, по которым происходит движение, определение направления их распространения, локализацию и распознавание встречного подвижного состава.

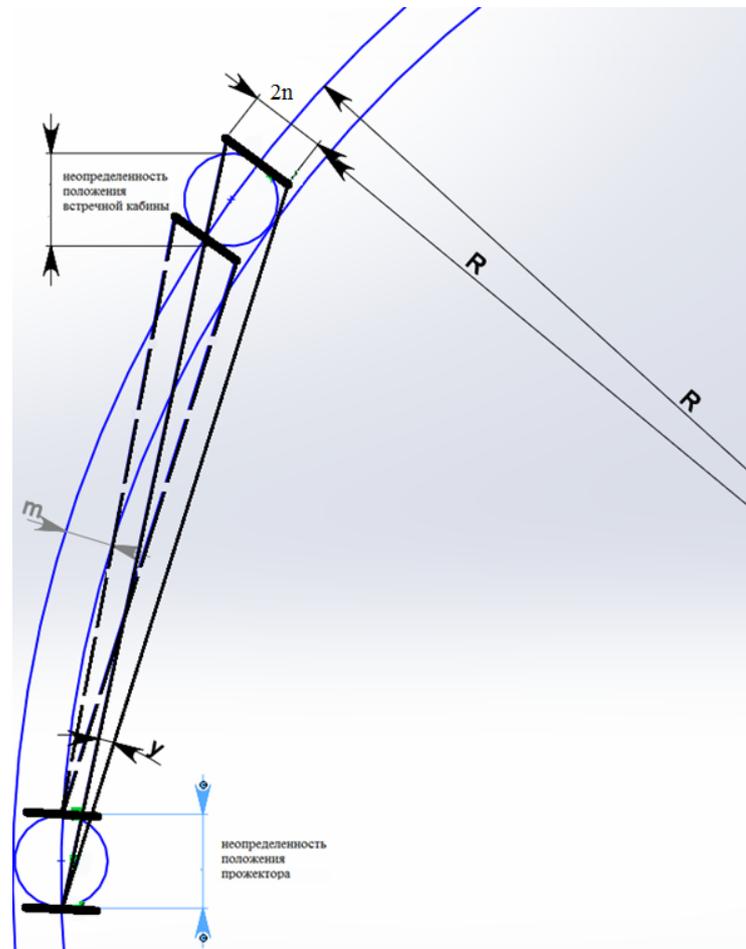


Рисунок 4.7 - К определению погрешности ширины угла прожектора в кривых.

Работа системы видеонаблюдения сопровождается значительными изменениями условий освещенности, что неизбежно приводит к изменению контраста изображения по яркости и засветке отдельных участков окружающей обстановки при определенных положениях солнца или при наличии зеркальных

объектов недалеко от пути, способных перераспределить световой поток солнца в сторону анализируемого участка.

Функционирование системы видеонаблюдения складывается из следующих временных этапов.

- 1) Получение изображения от системы.
- 2) Преобразование полученного изображения в бинарное (черно-белое).
- 3) Локализация важных компонентов (подвижной состав, пути) на бинарном изображении.
- 4) Принятие решения о наличии/отсутствии встречного подвижного состава и направлении путей.

Математически задачу преобразования цветного изображения в бинарное можно описать следующими функциональными выражениями

$$\begin{cases} i'(x, y) = 0, i(x, y) \leq p \\ i'(x, y) = 1, i(x, y) > p \end{cases} \quad [132], \quad (4.24)$$

где  $i'$  – яркость пикселя результирующего изображения,  $i$  – яркость пикселя исходного изображения,  $x, y$  – координаты пикселя,  $p$  – порог бинаризации. В данном выражении значение  $i'$  равное 1 будет придавать пикселю белый цвет.

Яркость пикселя исходного изображения рассчитывается из выражения.

$$i(x, y) = 0.3R + 0.59G + 0.11B, \quad (4.25)$$

где  $R, G, B$  – координаты цвета в модели RGB.

Существует несколько способов определения оптимального порога бинаризации [133]. Для выбора порога необходимо изучить геометрические и цветовые параметры распознаваемых объектов.

Система видеонаблюдения должна опознать 2 значимых объекта: подвижной состав и пути своего следования.

При однозначном расположении (определенное расположение камеры на определенном типе локомотива) система точно может определить начало пути, по которому происходит движение. Яркость пикселей пути

принципиально отличается от яркости окружения путей (фона) за счет отражения света от внешних источников таких как прожектор, солнце и т.п. Встречный поезд в также имеет яркие объекты – буферные фонари и прожектор. Для определения положения путей и положения прожектора с буферными фонарями удобно использовать определение порога на основе метода Отцу. Метод Отцу использует гистограмму распределения яркости пикселей на изображении и рассчитывает порог таким образом, чтобы внутриклассовая дисперсия белых и черных пикселей обработанного изображения была минимальна [134].

$$f_i = \frac{n_i}{N}, \quad (4.26)$$

где  $N$  – число пикселей изображения,  $n_i$  – число пикселей с уровнем яркости  $i$ .

$$\omega_0(p) = \sum_{i=0}^p f_i \quad (4.27)$$

$$\omega_1(p) = 1 - \omega_0(p), \quad (4.28)$$

где  $\omega_0$  и  $\omega_1$  – частоты появления пикселя черного и белого цветов соответственно

Тогда внутриклассовая дисперсия будет равна.

$$\sigma_{вкл}^2(p) = \omega_0(p) \cdot \sigma_0^2(p) + \omega_1(p) \sigma_1^2(p), \quad (4.29)$$

где  $\sigma_0^2$  и  $\sigma_1^2$  – дисперсии черного и белого класса пикселей соответственно.

Результаты бинаризации для различных ситуаций и погодных условий представлены на рисунках 4.8-4.12. При данном методе бинаризации необходимо учитывать, что пути, например, в зимнее время могут быть темнее фона. Таким образом, при невозможности нахождения и определения профиля пути, целесообразно дважды провести бинаризацию изображения, второй раз инвертировав выражение (4.24).



Рисунок 4.8 - Изображения реальное и обработанное путей ночью в зимнее время при наличии паразитной засветки.



Рисунок 4.9 - Изображения реальное и обработанное путей в сумерки в летнее время при отсутствии паразитной засветки.



Рисунок 4.10 - Изображения реальное и обработанное путей и встречного состава с включенными световыми сигналами днем в зимнее время при отсутствии паразитной засветки.



Рисунок 4.11 - Изображения реальное и обработанное путей и встречного состава с включенными световыми сигналами днем в зимнее время при отсутствии паразитной засветки.

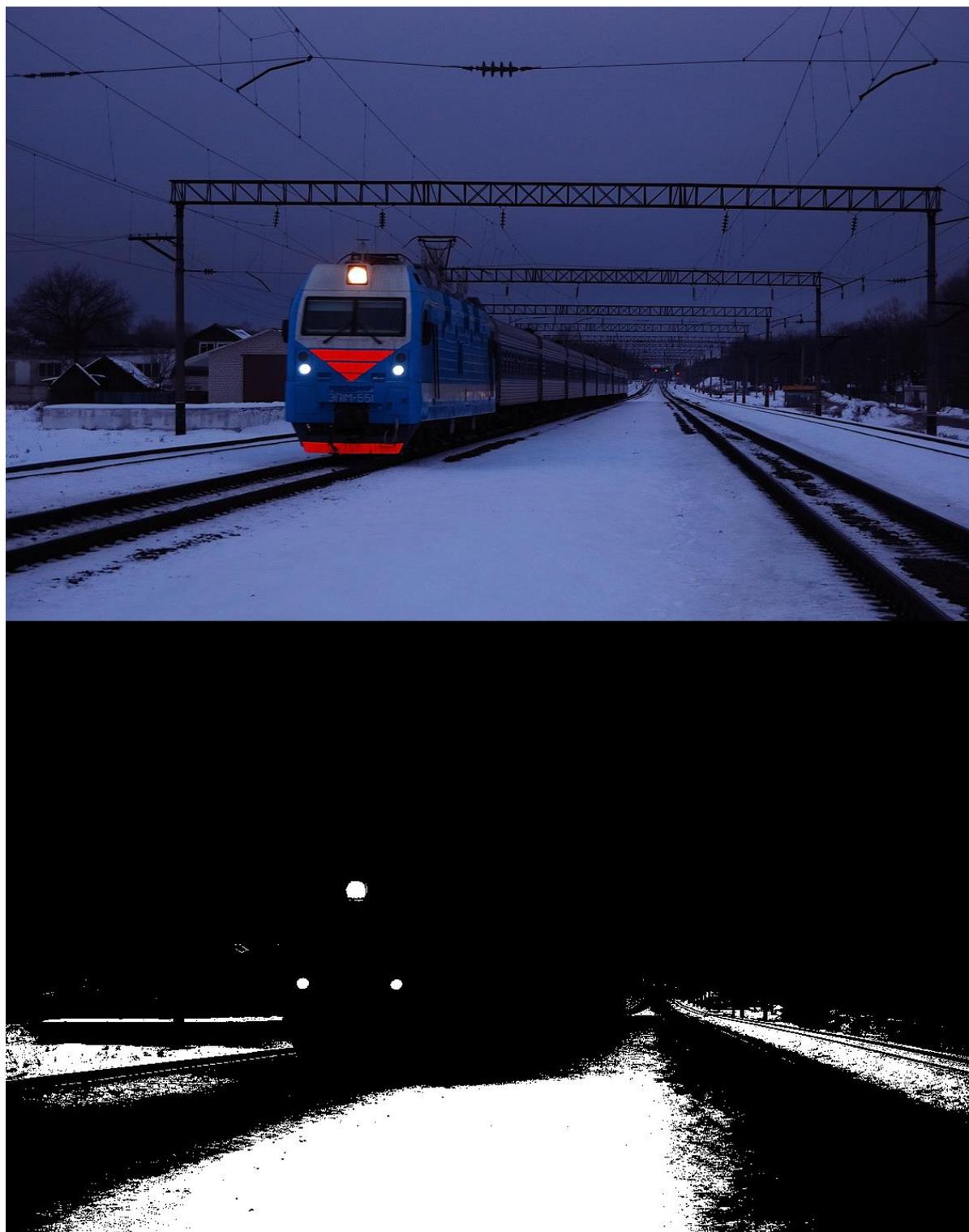


Рисунок 4.12 - Изображения реальное и обработанное встречного состава с включенными световыми сигналами ночью в зимнее время при отсутствии паразитной засветки.

Очевидно, что при достаточном контрасте объекта на фоне, локализация объекта не представляет трудностей. Так как априори известен начальный сегмент для поиска путей и встречных составов (для конкретного расположения системы видеонаблюдения), то для задачи локализации наиболее подходят корреляционный анализ изображения или преобразование Хафа.

Метод корреляционного анализа заключается в расчете корреляции эталонного и наблюдаемого изображения [135].

При поиске и локализации по эталону выполняется корреляционная обработка признаков, полученных от эталона и входного изображения, полученного от системы видеонаблюдения.

Из множества вариантов выбирается тот эталон, при котором получается максимальная сумма взаимной корреляции с изображением. Очевидно, что данный метод не оптимален для локализации встречного состава т. к. он изменяется в геометрических размерах и, в общем случае может выглядеть принципиально по-разному из-за особенностей дизайна. Таким образом, для локализации встречного подвижного состава потребуется большое количество эталонов как геометрически, так и структурно различных между собой. С другой стороны, при определенном положении системы видеонаблюдения для определенного типа подвижного состава существует ограниченное число эталонов для определения кривизны пути, благодаря чему можно получить довольно точное управление шириной пучка в повороте.

Преобразование Хафа предназначено для локализации на изображении линий, заданных параметрическими уравнениями [136]. Для повышения его точности применяется метод выделения градиента яркости. При этом, выделение градиента яркости на уже бинаризованной картине изображения позволит уменьшить количество вычислений так как множество элементов исходного изображения будет исключено из рассмотрения. Для упрощения преобразования исходное изображение разбивается на несколько сегментов, и преобразование

проводится только в тех, в которых изображение обязательно должно быть. Например, при конкретной установке системы видеонаблюдения первоначальное местоположение головки рельса известно. После этого преобразование Хафа проводится для этого квадрата и окружающих его областей. Таким образом, постепенно будет определена вся форма железнодорожного полотна.

К недостаткам управления КСС лобового прожектора при помощи системы видеонаблюдения можно отнести сложность определения положения и направления пути, особенно в плохую погоду и на дальних расстояниях, невозможность предсказания поведения пути после прохождения данного отрезка следования, относительно короткое расстояние, на котором будет точно определяться встречный локомотив.

Задача ЕКС состоит в поддержании заданной скорости и расчёта её оптимального значения и минимизации расхода электроэнергии при соблюдении расписания движения подвижного состава.

В состав ЕКС входят путевые (напольные) устройства, задачей которых является передача на локомотив информации о проходимом блок-участке (его длина, угол наклона и т.п.). Принципиально возможно дополнить информацию, передаваемую от напольных систем на локомотив, данными о кривых на блок-участке: длительность, радиус, последовательность на пути.

Таким образом, становится принципиально возможно управлять КСС лобового прожектора используя данные о конкретном блок-участке, синхронизируя и обновляя их в момент прохождения нового участка. Подобная система имеет способность «предугадывать» изменения горизонтального профиля кривой, основываясь на данных об скорости локомотива и времени прошедшего с момента получения данных о профиле пути блок-участка.

К недостаткам подобного решения можно отнести неспособность системы предотвращать ослепления встречной локомотивной бригады из-за отсутствия данных об ее месторасположении.

На основании вышесказанного, можно сделать вывод о том, что для оптимального управления КСС лобового прожектора способного повысить

безопасность движения локомотива необходимо использовать несколько систем. Наиболее точное управление будет иметь место при одновременной обработке информации от всех трех описанных выше элементов.

#### **4.4. Разработка системы передачи информации для локомотива через атмосферную оптическую линию связи**

Для передачи информации по открытому оптическому каналу связи на железной дороге необходимо по определенному закону изменять параметр амплитуды световой волны от передатчика. Осуществляют такую модуляцию в СИД посредством изменения тока накачки. Следует различать статический, при постоянном токе накачки, и динамический, при импульсной накачке, режимы работы передатчика излучения.

В СИД зависимость мощности излучения от частоты модуляции тока накачки представляется монотонной функцией [137].

$$P(f) = \frac{P_0}{\sqrt{1 + (2\pi f\tau)^2}}, \quad (4.30)$$

где  $P_0$  - мощность излучения при постоянном токе, Вт;

$\tau$  - время жизни неосновных носителей в области рекомбинации излучения электронно-дырочного перехода, с.

Предельная частота  $f$  модуляции СИД равна

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\tau} \quad (4.31)$$

Очевидно, что ее реальное значение меньше и существенно зависит от электрического импеданса диода.

$$f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_m C_m}} \quad (4.32)$$

$$f_3 = \frac{1}{2\pi C_j r_m}, \quad (4.33)$$

где  $C_j$  – ёмкость активного слоя, Ф;  $C_m$  – ёмкость монтажа, Ф;  $L_m$  – индуктивность монтажа, Гн;  $r_m$  – сопротивление монтажа, Ом.

Тогда предельная частота модуляции может быть оценена следующим образом:

$$f = \left( \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_3} \right)^{-1} \quad (4.34)$$

Кроме того, частоту модуляции в случае белого светодиода будет ограничивать люминофор. Влияние люминофора на частоту будет в первую очередь зависеть от состава и количества люминофора в конструкции светодиода.

Одним из главных параметров приемника излучения является спектральная характеристика чувствительности, которая отображает реакцию приемника на воздействие излучения с разной длиной волны, она определяет спектральную область применения прибора.

Другими немаловажным параметрами являются:

- энергетическая характеристика, которая отображает зависимость фотоотклика прибора от интенсивности возбуждающего потока излучения и в общем случае является нелинейной,

- пороговая характеристика, показывает способность фотоприемника регистрировать излучение малой интенсивности. В основном определяется уровнем собственных шумов прибора,

- частотная характеристика описывает зависимость чувствительности прибора от частоты модуляции излучения или длительности импульсов и характеризует инерционность прибора.

Инерционность фотоприемника характеризуют постоянные времени нарастания и спада фотоотклика для импульса излучения. Рост и спад фототока обычно описывается экспоненциальными зависимостями [137, 138].

Кроме того, необходимо учитывать эффекты многократных отражений от внешних элементов и элементов конструкции, которые могут возникнуть в приемнике. Многократные отражения уменьшают верхнюю граничную частоту сигнала, одним из способов борьбы с ними может быть ограничение диаграммы направленности приемника за счет элементов оптики или конструкции прибора.

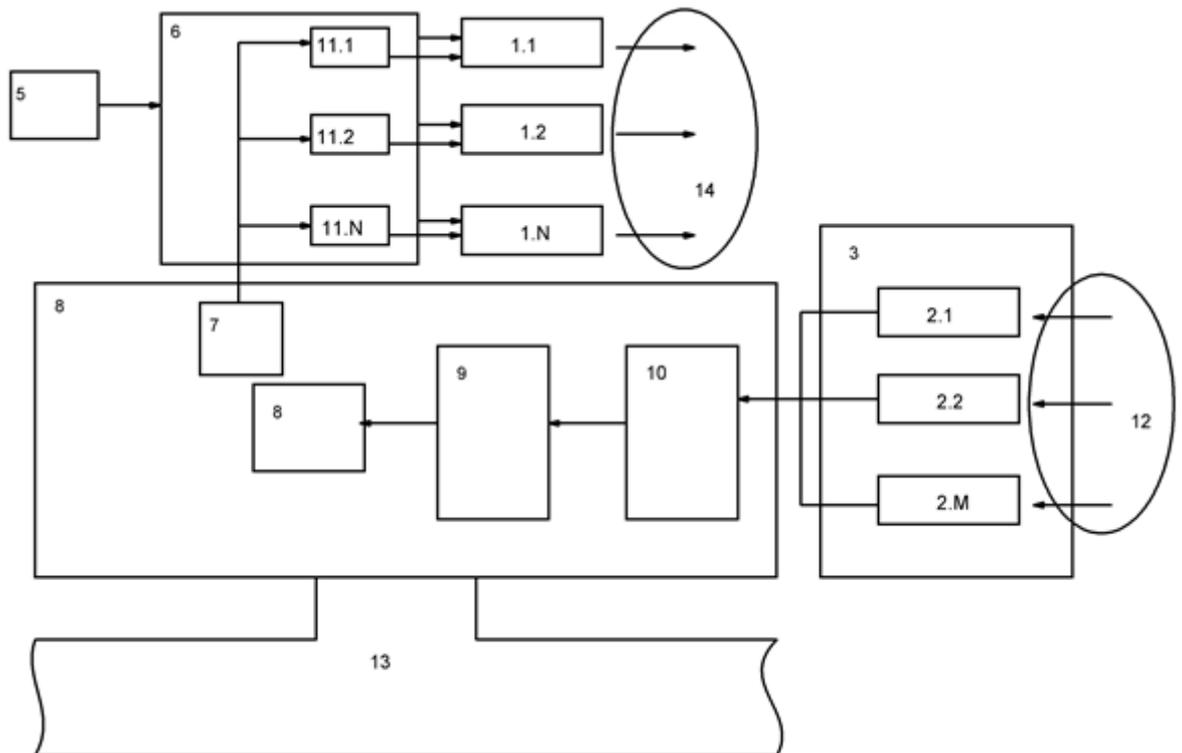
Непосредственное применение данного способа связи на железной дороге для обмена информацией между локомотивом и напольным оборудованием было затруднено ввиду малого применения светодиодов на подвижном составе, например, в качестве прожектора, а также из-за узкого луча прожектора локомотива, т.к. данный вид связи требует точной наводки источника на приемник. При использовании на локомотиве прожектора с широкой переменной диаграммой направленности, становится принципиально возможно наводить информационный пучок на любое месторасположение приемника около путей. Сигнал принципиально возможно подмешивать к уровню постоянного света от прожектора, при помощи добавления небольшого процента высокочастотной пульсации. Машинист данную пульсацию ощущать не будет, т.к. максимальная частота, на которую реагирует человеческий организм не превышает килогерца [139]. Таким образом, на железной дороге становится возможно организовать новый канал связи, что положительно скажется на достоверности передаваемой информации и на безопасности движения.

Для реализации данной функции в прожектор локомотива [140] железнодорожного транспорта введены модули световых излучателей, выполняющие функции передатчиков информации, использующих в качестве среды передачи информации открытый атмосферный канал, а на защитном стекле осветительного устройства устанавливается набор фотоприемников. В световом потоке передающих модулей практически не содержится спектра, к которому

чувствительны фотоприемники, таким образом, паразитная засветка прожектора от собственной работы отсутствует.

На рисунке 4.13 приведена схема работы прожектора локомотива железнодорожного транспорта.

Блок управления создает управляющие сигналы на модуляторе, который создает пачки коротких импульсов высокой частоты на маломощные ключи блока питания. Каждый ключ управляет своим передающим модулем (со своей собственной КСС), а именно частью тока через него. При этом ток, которым управляет ключ, мал по сравнению с токами рабочих режимов модулей. Таким образом, ключ управляет относительно малой мощностью.



1.1...1.N – передающие модули (где  $N \geq 1$ ), 2.1...2.M – инфракрасные фотоприемники (где  $M \geq 1$ ), 3 – защитное стекло прожектора локомотива, 4 – блок управления, 5 – блок ручного управления, 6 – блок питания, 7 – модулятор, 8 – демодулятор, 9 – полосовой фильтр, 10 – интегрирующий усилитель с ограничителем, 11.1...11.N – маломощный ключ (где  $N \geq 1$ ), 12 – принимаемое излучение, 13 – линия передачи информации системы безопасности локомотива, 14 – передаваемое излучение.

Рисунок 4.13 - Структурная схема предлагаемого устройства.

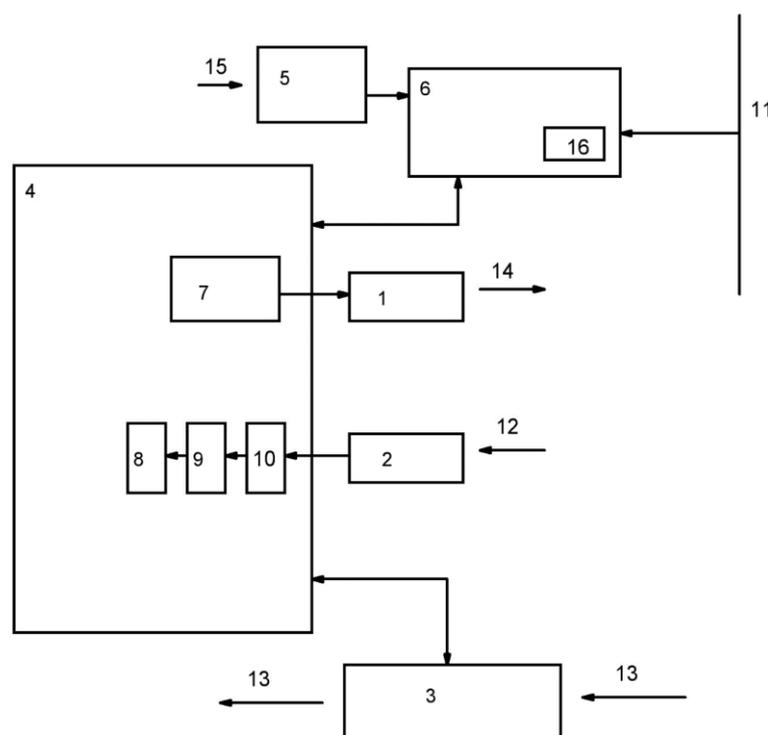
Кроме оборудования на ПС необходимо иметь стационарное оборудование открытого атмосферного канала около путей которое способно организовать канал передачи данных с ПС.

Решение этой задачи достигается тем, что на опоры контактной сети или на аналогичные устройства (например, для не электрифицированных участках пути) устанавливаются модули приема-передачи, использующие в качестве среды передачи информации открытый атмосферный канал [141].

Сущность изделия заключается в том, что устройство имеет способность подключаться к системе устройств СЦБ, принимать и передавать информацию в систему устройств по протоколам передачи данных; фотоприемник способен принимать сигналы видимого и инфракрасного спектра; передающий модуль состоит из светодиодов инфракрасного спектра.

На рисунке 4.14 приведена структурная схема приема-передающего устройства.

Фотоприемник, располагается так, что световой поток передающего модуля на него не попадает, таким образом, паразитная засветка устройства от собственной работы отсутствует. Блок питания получает основное питание от электрической сети, в этом режиме он обеспечивает питанием все приемные и передающие части устройства. В маловероятном случае обрыва электрической сети блок питания переходит на резервное питание от фотоэлемента, который получает энергию от солнечного излучения, или от аккумулятора. Если солнечная энергия недоступна, в режиме резервного питания устройство отключает передающий модуль, обеспечивая питанием лазерный блок приема-передачи и фотоприемник, которые потребляют относительно малую мощность, позволяя тем самым долгое время поддерживать работоспособность линии связи.



1 – инфракрасный передающий модуль, 2 – фотоприемник, 3 – лазерный блок приема-передачи, 4 – блок управления, 5 – фотоэлемент, 6 – блок питания, 7 – модулятор, 8 – демодулятор, 9 – полосовой фильтр, 10 – интегрирующий усилитель с ограничителем, 11 – электрическая сеть, 12 – принимаемое излучение, 13 – лазерное излучение, 14 – передаваемое излучение, 15 – солнечное излучение, 16 – аккумулятор.

Рисунок 4.14 - Структурная схема предлагаемого устройства

Одной из проблем практического внедрения подобной системы является точная наводка приемника на передатчик. В случае локомотива использование всех светодиодных модулей является энергетически не эффективным и может вызвать дополнительные паразитные засветки на напольном оборудовании. Таким образом, системе, расположенной на локомотиве, необходимо определить месторасположение напольного оборудования. Для этого можно использовать напольную аппаратуру ЕКС, дополнительно зашифровав в нее информацию о месторасположении ответного для локомотива оборудования АОСПИ.

Изменение положения  $\varphi(t)$  части КСС лобового прожектора, использующейся для передачи информации от времени  $t$  проезда последнего

местоположения напольного оборудования для движения по прямой рассчитывается следующим образом.

$$\varphi(t) = \operatorname{arctg}\left\{\frac{m}{L(t)}\right\}, \quad (4.34)$$

где  $L(t)$  – расстояние до напольного оборудования вдоль пути, м;  $m$  – расстояние от пути до напольного оборудования по горизонтали, м.

Для движения по кривой радиуса  $R$   $\varphi(t)$  рассчитывается для двух различных положений приемника (см. рисунки 4.15, 4.16).

Для случая размещения напольного оборудования внутри круга по дуге которого движется подвижной состав выражение для  $\varphi(t)$  примет вид.

$$\varphi(t) = \varphi(t)_1 + \alpha(t), \quad (4.35)$$

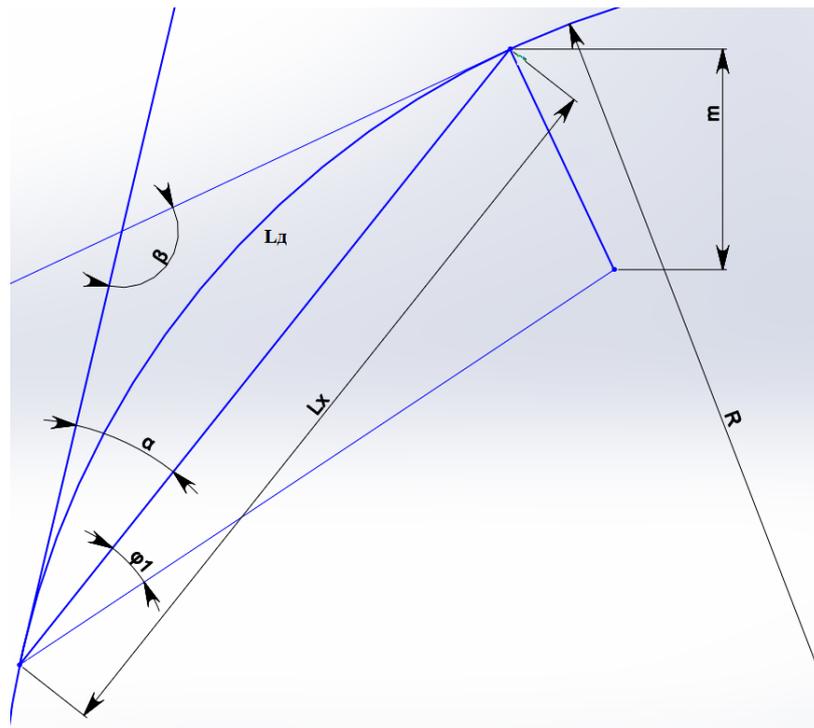


Рисунок 4.15 - Пояснение к расчету изменения угла передачи информации.

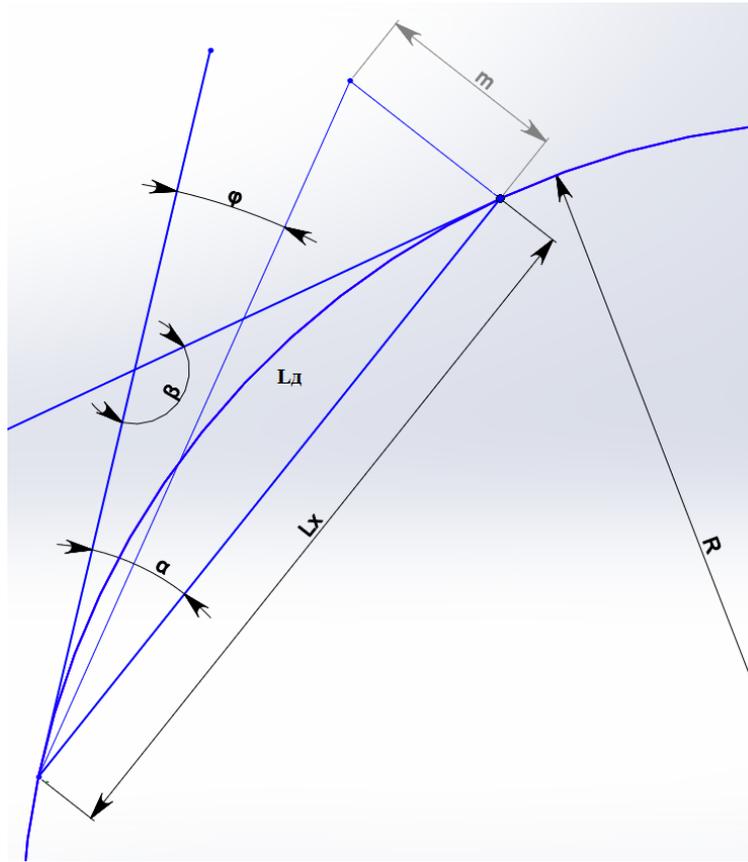


Рисунок 4.16 - Пояснение к расчету изменения угла передачи информации. где  $\alpha(t)$  – угол между касательной к кривой пути и хордой, стягивающей дугу, равную расстоянию по пути в кривой от подвижного состава до напольного оборудования, градус;

$$\varphi(t)_1 = \operatorname{arctg} \left\{ \frac{m \cdot \cos \varphi(t)_2}{m \cdot \sin \varphi(t)_2 - L_x(t)} \right\}, \quad (4.36)$$

где  $m$  – расстояние от пути до напольного оборудования по горизонтали, м;  $L_x(t)$  – хорда, стягивающая дугу, равную расстоянию по пути в кривой от подвижного состава до напольного оборудования, м.

$$L_x(t) = 2R \sin \left\{ \frac{180^\circ \cdot L_d(t)}{\pi R} \right\}, \quad (4.37)$$

где  $L_d(t)$  – расстояние по пути в кривой от подвижного состава до напольного оборудования, м;  $R$  – радиус кривой, м.

$$\varphi(t)_2 = \beta(t) + \alpha(t), \quad (4.38)$$

где  $\beta(t)$  – угол между касательной к кривой пути и касательной в точке проекции напольного оборудования на кривую пути, градус.

$$\beta(t) = \frac{360^\circ - 2\alpha(t)}{2}, \quad (4.39)$$

Для случая размещения напольного оборудования вне круга по дуге которого движется подвижной состав выражение для  $\varphi(t)$  примет вид (см. рисунок 4.13).

$$\varphi(t) = \arctg \left\{ \frac{L_x(t) \cdot \sin\{\alpha(t)\} + m \cdot \cos\{\beta(t)\}}{m \cdot \sin\{\beta(t)\} - L_x(t) \cdot \cos\{\alpha(t)\}} \right\} \quad (4.40)$$

Для получения выражений (4.34) - (4.40) использовались методы аналитической геометрии.

Очевидно, что  $L_x(t)$  и  $L(t)$  в общем случае зависят также от скорости локомотива на участке пути. Эту информацию можно получить из ЕКС, расположенной на локомотиве.

Для экономии электроэнергии удобно использовать следующий алгоритм связи. Напольное оборудование отключает передающий модуль до получения сигнала от подвижного состава. В ответном сигнале аппаратура посылает данные МДВ, полученные на основе изменения мощности принимаемого лазерного сигнала, чтобы скорректировать мощность передатчика подвижного состава.

Для оценки необходимой мощности передатчика проведем оценку энергетических потерь излучения на трассе передачи сигнала.

Мощность сигнала передатчика на выходе из локомотива равна

$$P_{пер} = P_{СИД} \eta_1, \quad (4.41)$$

$$\eta_1 = \frac{\Phi_l}{\Phi_{СИД}}, \quad (4.42)$$

где  $\Phi_l$  – световой поток после прохождения оптической системы передатчика и защитного стекла, Лм;  $\Phi_{СИД}$  – световой поток излучателя, Лм.

При расстоянии между приемником и передатчиком  $L$  (см. рисунок 4.17), геометрические потери  $L_{геом}$  можно оценить следующим образом.

$$L_{\text{geom}} = \left( \frac{D_{\text{пят}}}{D_{\text{лпр}}} \right)^2, \quad (4.43)$$

где  $D_{\text{пят}}$  – диаметр пятна от излучения передатчика в плоскости приемника, м;  $D_{\text{лпр}}$  – диаметр линзы приемника, м.

$$D_{\text{пят}} = 2L \cdot \text{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (4.44)$$

КПД  $\eta_2$  оптики приемника можно оценить по формуле.

$$\eta_2 = \frac{\Phi_{\phi}}{\Phi_{\text{лпр}}}, \quad (4.45)$$

где  $\Phi_{\phi}$  – световой поток попавший на поверхность фотодиода, Лм;  $\Phi_{\text{лпр}}$  – световой поток попавший на приемную линзу, Лм.

Так как длина связи разрабатывается на основе светодиодов с относительно широкой диаграммой направленности (по сравнению с лазерным излучением), то нецелесообразно разрабатывать длину линии более нескольких сотен метров из-за больших геометрических потерь.

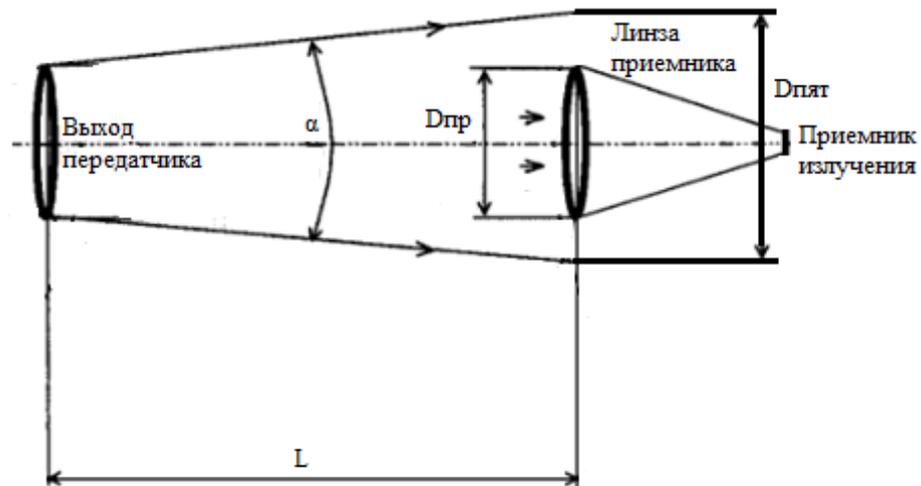


Рисунок 4.17 - Пояснение к расчету геометрических потерь сигнала.

С другой стороны, при слишком малой ширине диаграммы направленности линия связи будет прерываться по причине относительно больших по амплитуде и

случайных по направлению угловых перемещений приемника относительно передатчика.

Потери светового сигнала при движении на трассе  $L_{атм}$  длиной  $L$ , можно оценить из выражения [142].

$$L_{атм} = S_m L, \quad (4.46)$$

где  $S_m$  - метеорологическая дальность видимости,  $m^{-1}$ .

Таким образом, мощность сигнала, попадающего на приемник равна.

$$P_{np} = P_{сид} \eta_1 \eta_2 L_{геом} L_{атм} \quad (4.47)$$

Мощность  $P_{np}$  должна быть больше  $P_{npmin}$ , которая в общем случае определяется уровнем внешней засветки, а также уровнем собственных шумов приемника.

Очевидно, что при движении локомотива расстояние между приемником и передатчиком будет уменьшаться. Физически это приведет к увеличению сигнала на приемнике и, как следствие, его насыщению. Линия связи будет нарушена. Эффективным решением этой проблемы является уменьшение мощности передаваемого сигнала по мере приближения подвижного состава к напольному оборудованию. Таким образом будет уменьшаться потребляемая передатчиком мощность. Изменение мощности передатчика при изменении длины трассы можно описать, используя выражение (4.35).

$$P_{сид}(L) = \frac{D_{np} P_{np}}{2\eta_1 \eta_2 L^2 \cdot tg\left(\frac{\alpha}{2}\right) S_m} \quad (4.48)$$

## 4.5. Выводы

1. Стандартный ламповый прожектор не обеспечивает безопасности движения локомотива на кривых участках и ослепляет встречную локомотивную бригаду [143].

2. Для повышения безопасности движения локомотива на кривых участках необходимо использовать прожектор со сложной КСС,

3. Для предотвращения ослепления встречной бригады необходимо динамически изменять КСС прожектора, отключая отдельные элементы узкоградусной оптики, оставляя максимально возможную освещенность пространства впереди локомотива.

4. При реализации системы необходимо обеспечить охлаждение с учетом максимальной потребляемой мощности.

5. Для эффективного управления изменением КСС необходимо использовать информацию, получаемую от различных систем, установленных на подвижном составе, в том числе ЕКС в которую необходимо предварительно внести данные о горизонтальном профиле пути.

6. Использование АОЛС на железной дороге становится принципиально возможным при использовании технологии прожектора с широким пучком света.

7. Для эффективного управления углом передачи данных от локомотива на напольное оборудование является использование данных о расположении этого оборудования и скорости подвижного состава, полученные от систем ЕКС.

## Заключение

В результате проведенных исследований получено следующее.

1. На основе разработанных оптических моделей кабины машиниста предложены системы светильников общего освещения. Внедрение данных систем на тепловозы серий ТЭМ9Н, ТГМ4Б, ТЭМ31М, ТЭМ2 позволило уменьшить габариты кабины машиниста и упростить способ установки лобовых стекол. Данные изменения позволили снизить себестоимость кабины, не приводя к нарушению требований безопасности по общему освещению.

2. На основе анализа существующих подходов к проектированию узкоградусной оптики с учетом специфики области применения разработана методика расчета узкоградусной системы прожектора локомотива. На основе данной методики были разработаны и внедрены в опытную эксплуатацию на несколько серий локомотивов железных дорог общего и необщего пользования модульные светодиодные прожектора, позволившие снизить потребление энергии от бортовой сети локомотива в 3,57 раз и повысить надежность системы освещения за счет поддержания рабочего состояния и возможности безопасно продолжить движение при отказе отдельных элементов прожектора.

3. Показано, что стандартный локомотивный прожектор не обеспечивает безопасность движения в ночное время. Для повышения безопасности разработан светодиодный прожектор с широкой диаграммой направленности и система управления для него. Внедрение данной системы позволяет равномерно освещать путь в ночное время при любой кривизне пути, не ослепляя встречную локомотивную бригаду.

4. На основе анализа возможных направлений внедрения выполненной научной работы, предложен принцип реализации АОЛС в качестве дополнительного канала связи между подвижным составом и напольным оборудованием железных дорог.

5. Разработанные системы светильников общего освещения и прожекторов на основе светодиодов внедрены на несколько серий электровозов и тепловозов, а также на газотурбовоз ГТ1Н, всего более 200 локомотивов, применяемых на железных дорогах общего и необщего пользования.

## Основные сокращения и условные обозначения

АОЛС – атмосферная оптическая линия связи

АОСПИ - атмосферно-оптической система передачи информации

ДН – диаграмма направленности

ЕКС – единая комплексная система управления и обеспечения безопасности движения на тяговом подвижном составе

КПД – коэффициент полезного действия

КСС – кривая силы света

ЛН – лампа накаливания

МДВ – метеорологическая дальность видимости

ПС – подвижной состав

СДМ – светодиодная матрица

СИД – светодиод

СТ – световое тело

СЦБ – сигнализация, централизация и блокировка

## Список литературы

1. Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 (с изменениями на 11 июня 2014 года): распоряжение Правительства РФ от 22.11.2008 № 1734-р в ред. распоряжения Правительства РФ от 11.06.2014 № 1032-р. // Собрание законодательства РФ, 2014, № 25. ст. 3349.
2. О Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года: распоряжение Правительства РФ от 17.06.2008 № 877-р // Собрание законодательства РФ, 2008, № 29. ст. 3537.
3. МПС России. Концепция информационной подсистемы многоуровневой системы управления и обеспечения безопасности движения поездов (АСУ МС). Сокращенный вариант. - М.: Из-во ВНИИУП. – 2003г. – 56 с.
4. Концепция комплексной программы «Внедрение светодиодной техники в ОАО «РЖД» / Ададуров С.Е. [и др.] // Автоматика, связь, информатика. – 2009. – № 2. – с. 2-5. ISSN 0005-2329.
5. А.Н. Пихтин. Квантовая и оптическая электроника / А.Н. Пихтин. - СПб. Из-во Абрис. - 2012. - 656 с.
6. Берг А, Светодиоды / А. Берг, П. Дин. – М. : Из-во Мир. - 1979. – 686 с.
7. Коган Л.М. Полупроводниковые излучающие диоды / Л.М. Коган. – М. : Из-во Энергоатомиздат. - 1983. – 206 с.
8. Шуберт Ф. Светодиоды/ Ф. Шуберт. пер.с англ. под ред. А.Э. Юновича. 2-е изд. – М. : Из-во ФИЗМАТЛИТ. 2008. – 496 с. – ISBN 978-5-9221-0851-5.
9. Maruska H.P. The preparation and properties of vapour-deposited single-crystalline GaN / H. P. Maruska, J.J. Tietjen. // Appl. Phys. Lett. 1969. Vol.15. - p.327-329.
10. Ikasaki I. Nitride semiconductors – impact on the future world / I. Ikasaki. // J. Cryst Growth. - 2002. - Vol. – p. 237-239.

11. Akasaki I. GaN Based UV/blue light-emitting devices GaAs and Related Compounds conference / I. Akasaki [и др.] // Inst. Phys. Conf. Ser. -1992. – Vol. 129. – p. 851-856.
12. Guo X.. Photon recycling semiconductor light-emitting diode/ X. Guo, J. W. Graff, E. F. Schubert. //IEDM Technical Digest IEDM. -1999. - p. 600.
13. Nakamura S. The blue laser diode / S. Nakamura, G. Fasol. // Springer. - 1997. ISBN 978-3-662-03464-4.
14. ГОСТ 32216-2013. Специальный подвижной состав. Общие технические требования. М.: Из-во Стандартиформ. 2014. – 28с.
15. ГОСТ Р 55434-2013. Электропоезда. Общие технические требования. М.: Из-во Стандартиформ. 2014. – 58с.
16. ГОСТ 31428-2011. Тепловозы маневровые с электрической передачей. Общие технические требования. М.: Из-во Стандартиформ. 2011. – 32 с.
17. ГОСТ Р 55364-2012. Электровозы. Общие технические требования. М.: Из-во Стандартиформ. 2013. – 34 с.
18. Фонари сигнальные светодиодные локомотивов, пассажирских вагонов, моторвагонного и специального подвижного состава железнодорожного транспорта. Светотехнические требования. М.: 2009. – 7 с.
19. Railway Group Standard. GM/RT2180. Visibility and audibility of trains on the Track. 1995.
20. UIC 534 Signals and signal supports of locomotives, motor units and multiple units.
21. Мурашова М.А. Оценка мешающего влияния осветительных приборов на видимость сигналов светофоров. / М. А. Мурашова, О. П. Пинчук, Л. П. Юдин. // Вестник ВНИИЖТ. 1995. - № 4. - с. 23 – 28.
22. Response to Simulated Traffic Signals Using Light / J/ D. Bullough [и др.]. // Emitting diodes and incandescent sources. Rensselaer Polytechnic Institute Record. - 2001. - p. 39.

23. Bullough J.D. Effects of sweeping, color and luminance. Distribution Response to Automotive Stop Lamps. / J. D. Bullough. // SAE Technical Paper Series. - 2002 – 7 p.
24. Caltrans. State of California, Department of Transportation, Alternative Traffic Signal Illumination, Final Report, Sacramento, CA: State of California, Department of Transportation, 1997.
25. Conway K.M. Will LEDs Transform traffic signals of they have exit signs? / K. M. Conway. //Proceedings of the Illuminating Engineering Society of North America, Annual Conference. – 2001.
26. Балтик траст [электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.baltictrust.ru>, свободный. – Загл. с экрана.
27. Корвет-Лайтс [электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.corvette-lights.ru>, свободный. – Загл. с экрана.
28. Транс-Сигнал [электронный ресурс]. Режим доступа: <http://trans-signal.ru>, свободный. – Загл. с экрана..
29. Pintsch Bamag GmbH [электронный ресурс]. Режим доступа: <http://pintschbamag.de/en/>, свободный. – Загл. с экрана.
30. Helmholtz & Pauli GmbH [электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.helopal.de>, свободный. – Загл. с экрана.
31. MSVelektronika [электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.msvelektronika.cz/en/>, свободный. – Загл. с экрана.
32. Дизель-поезда. Нормы безопасности. НБ ЖТ ЦТ 01-98. Ред. 2 – М.: Минтранс России. – 1998. – 83 с.
33. Тепловозы. Нормы безопасности. НБ ЖТ ЦТ 02-98. Ред. 1 – М.: ОАО «РЖД». – 2003. – 87 с.
34. Электропоезда. Нормы безопасности. НБ ЖТ ЦТ 03-98. Ред. 1 – М.: Минтранс России – 2003. – 196 с.
35. Электровозы. Нормы безопасности. НБ ЖТ ЦТ 04-98. Ред. 1 – М.: Минтранс России – 2003. – 87 с.

36. ГОСТ. 12.2.056-081. Система стандартов безопасности труда. Электровозы и тепловозы колеи 1520 мм. Требования безопасности. - М.: ИПК Издательство стандартов. – 2002. – 30 с.
37. Устройство и ремонт тепловозов./ Л.А. Собенин, В.И. [и др.]. - М. Из-во «Академия». 2004. – 416 с.
38. Лисма : лампы накаливания прожекторные ПЖ [электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.lisma-guprm.ru/index.php?id=51 &type=2&viewid=1114](http://www.lisma-guprm.ru/index.php?id=51&type=2&viewid=1114), свободный. – Загл. с экрана.
39. OSRAM. Halopin eco superstar. Datasheet. – 2015. – 5 с.
40. Справочная книга по светотехнике под ред. Ю.Б. Айзенберга. – М.: Энергоатомиздат. 1983. – 472 с.
41. CREE. XLamp. XT-E Leds. Rev. 10. Datasheet. 16 с.
42. LED Life for General Lighting: Definition of Life. ASSIST recommends..., Vol. 1, Issue 1. Alliance for Solid-State Illumination Systems and Technologies. 2005. – 5 p.
43. CREE. XLamp. Long-Term Lumen Maintenance. 2009. – 10 с.
44. Иванов А.П. Электрические источники света / А.П. Иванов. –Л.: Из-во Госэнергоиздат. – 1955. - 288 с.
45. Murphy T. W., Jr. Maximum spectral luminous efficacy of white light / T. W. Jr. Murphy. // J. Appl. Phys. — 2012. — Vol. 111. — № 10. — ISSN 1089-7550.
46. ОСТ 32.120-98. Нормы искусственного освещения объектов железнодорожного транспорта. Стандарт отрасли. М.: Из-во Министерстпо путей сообщения. – 1998. – 92 с.
47. Тищенко Г.А. Осветительные установки / Г А. Тищенко.- М.: Из-во Высш. шк. 1984 - 247с.
48. Расчет и проектирование искусственного освещения помещений общественных зданий. Пособие к МГСН 2.06-99. 1999 – 175с.

49. ЗАО МОСТКОМ: Беспроводная связь - вопросы выбора [электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.mostkom.ru/articles/article3/article3.htm>, свободный. – Загл. с экрана.
50. Кобзев В. В. Применение оптических квантовых генераторов для целей связи / В. В. Кобзев, Б. М. Милинкис, Р. Г. Емельянов. - М. : Из-во Связь, 1965. - 120 с.
51. Пратт В.К. Лазерные системы связи / В. К. Пратт. - М.: Из-во Связь. 1972. – 232 с.
52. Оптические системы передачи информации по атмосферному каналу / Р.А. Казарян, [и др.] ; под. ред. Р.А. Казаряна. М.: Из-во Радио и связь. – 1985. – 208 с.
53. Гауэр Д. Оптические системы связи / Гауэр Д. пер. с англ. М. : Из-во Радио и связь. - 1989. – 504 с.
54. Клюков А.В. Беспроводные ИК – технологии, истинное качество «последней мили» / А. В. Клюков. // Технологии и средства связи. - 1999. - № 5.- с. 40-44.
55. Клюков А.В. Беспроводная оптическая связь – Мифы и реальность / А. В. Клюков. // Технология и средства связи. - 2000. - № 6. - с. 12-13.
56. Алякишев С.А. Передача телевизионного изображения и звука с помощью лазера/ С. А. Алякишев [и др.] // Техника кино и телевидения. - 1965. - № 5. - с. 45-49.
57. Аппаратура для передачи телевидения с помощью лазера. / Д. И. Аркадьев [и др.]. // Техника кино и телевидения. - 1971. - № 4. - с. 60-62.
58. Кулик Т. К. Методика сравнительной оценки работоспособности лазерных линий связи/ Т. К. Кулик, Д. В. Прохоров. // Технология и средства связи. - 2000. - № 6. - с. 8-18.
59. Лазерные информационные телекоммуникации: Расчет атмосферной оптической линии связи для г. Екатеринбурга [электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.laseritc.ru/?id=124&pg>, свободный. – Загл. с экрана.

60. Медвед Д.Б. Влияние погодных условий на беспроводную оптическую связь / Д. Б. Медвед. // Вестник связи. - 2001. - № 4. - с. 154-157.
61. Зуев В.Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. / В. Е. Зуев. - М.: Из-во Соврадио. - 1970. - 496 с.
62. Зуев В.Е. Распространение лазерного излучения в атмосфере / В. Е. Зуев. - М.: Из-во Радио и связь. - 1981. - 288 с.
63. Физика атмосферы и проблемы климата / Г. В. Розенберг [и др.] - М.: Наука. – 1980. - 320 с.
64. Особенности применения оптических линий связи./ Т. К. Кулик. [и др.] // Лазер информ. - 2001 № 9-10 (216-217). - с. 1-6.
65. Николаев А.Ю. Расчет надежности работы атмосферной оптической линии связи./ А. Ю. Николаев. // Информост - Средства связи. – 2001. - № 4 (17). - с. 26-27.
66. СКС (структурированная кабельная система): Использование атмосферной оптической линии связи FSO в сетях передачи данных [электронный ресурс]. Режим доступа: <http://оскс.ru/?p=5608>, свободный. – Загл. с экрана.
67. Canobeam - Free Space Optics [электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ftp.molexprn.ru/products/files/brochures/Canobeam%20Flyer%20-%20RU%206d.pdf>, свободный. – Загл. с экрана.
68. Давиденко Ю.И. Современная схемотехника в освещении/ Давиденко Ю.И. – СПб.: Из-во Наука и техника. - 2008. –320 с.
69. Сергеев Б.С. Светодиодные светофоры: проблемы разработки и применения / Б. С, Сергеев, С. А. Щиголев, В. Г. Любар. // Автоматика связь, информатика. – 2001.- № 5. – с. 19-23. ISSN 0005-2329.
70. Харитонов И.В. Анализ освещенности кабины маневрового тепловоза / И. В, Харитонов, Б. С, Сергеев, А. Д. Волосников. // Транспорт Урала. – 2014. - № 2– с. 73-76. ISSN 1815-9400.
71. СП 2.5.1336-03. Санитарные правила по проектированию и реконструкции локомотивов и специального подвижного состава

железнодорожного транспорта. Российская газета № 119/1 2003 ИД "УралЮрИздат" № 2007.

72. СНИЭТ ЦУВСС-6/35-96 Тяговый и моторвагонный подвижной состав железнодорожного транспорта. Санитарные нормы и эргономические требования к проектированию кабин и оборудования тягового и моторвагонного подвижного состава железнодорожного транспорта.

73. Кнорринг Г.М. Светотехнические расчеты в установках искусственного освещения / Г. М. Кнорринг. Л. : Из-во Энергия. - 1973 – 200 с.

74. Кнорринг Г.М. Справочная книга для проектирования электрического освещения / Г. М. Кнорринг, И. М. Фадин, В. Н. Сидоров. - СПб.: Из-во Энергоатомиздат. – 1992. – 448 с. ISBN 5-283-04464-5.

75. Балашов О.П. Электрическое освещение / О. П. Балашов, Н. А. Парфенова. / – Рубцовск. : Из-во Рубцовский индустриальный институт. - 2012. – 200 с.

76. ГОСТ 9238-83. Габариты приближения строений и подвижного состава железных дорог колеи 1520 (1524) мм. - М.: Из-во Стандартиформ. – 2006. – 30 с.

77. Заявка на пат. РФ № 2014120395/07 МПК F21S 8/00. Светодиодный светильник. Манько Н.Г., Мансуров В.А., Харитонов И.В. Волосников А.Д. опубл. 27.11.15, Бюл. №33. – 1 с.

78. Пат. США № 7678140, МПК A61N 5/0618. Photoreceptor system for melatonin regulation and phototherapy. G. Brainard, G. Glickman. опубл. 27.12.2001.

79. Бижак Г. Спектры излучения светодиодов и спектр действия для подавления секреции мелатонина / Г. Бижак, М. Б. Кобав. // Светотехника. – 2012. -№3. – с. 11-16. ISSN 0039-7067.

80. Анисимов В.Н. Мелатонин: роль в организме, применение в клинике / В. Н. Анисимов. // РМЖ. - 2006 - т.14. - №4. – 269 с.

81. О биологическом эквиваленте излучения светодиодных и традиционных источников света с цветовой температурой 1800-10000 К / А. В. Аладов [и др.] // Светотехника. – 2012. -№3. – с. 7-10. ISSN 0039-7067.

82. In-Car Nocturnal Blue Light Exposure Improves Motorway Driving: A Randomized Controlled Trial / Taillard J. [и др.] // Электронный журнал «PLOS ONE», Опубл. 19.10.2012. eISSN-1932-6203. Режим доступа: <http://www.plosone.org/article/info%3Adoi%2F10.1371%2Fjournal.pone.0046750>, свободный. – Загл. с экрана.

83. Пат. №153592 Российская Федерация, МПК F21S10/00, H01L33/00. Светодиодный светильник общего назначения / Манько Н.Г., Мансуров В.А., Харитонов И.В.; заявитель и патентообладатель АО НПО «Автоматики» -№ 2013146909/07; заявл. 21.10.13; опубл. 27.07.15, Бюл. №21.- 1 с.

84. Харитонов И.В. Интеллектуальные возможности применения светодиодных систем на локомотивах железнодорожного транспорта / Б. С. Сергеев, И. В. Харитонов. // Труды третьей научно-технической конференции с международным участием «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование. ИСУЖТ-2014. – 2014. - с. 217-219.

85. Харитонов И.В. Принципы расчета освещенности кабины машиниста / И. В. Харитонов. // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – Екатеринбург: УрГУПС. - 2014 - №4. – с 99 - 103. ISSN 2079-0392.

86. Авента: характеристики ламп накаливания [электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.aventa-elektro.ru/infa/haract.php>, свободный. – Загл. с экрана.

87. Трембач В.В. Световые приборы / В. В, Трембач. – М.: Из-во Высш.шк. 1990 – 463 с.

88. Харитонов И.В. Особенности проектирования узкоградусной линзы для светодиодного прожектора локомотива / И. В. Харитонов, Б. С. Сергеев. // Электроника и электрооборудование транспорта. №5. - 2014. – с. 11-13.

89. Данилина Т.И. Создание микрорельефных поверхностей в просветляющих оптических покрытиях для повышения внешней квантовой эффективности синих светодиодов на основе GaN. / Т. И. Данилина, П. Е. Троян, И. А. Чистоедова. // Нанoeлектроника. Нанотехнология. Фотоника. Физическая и

плазменная электроника. Доклады ТУСУРа, № 2 (24), часть 2, декабрь 2011. - с. 64-67.

90. Г. Э. Романова. Моделирование вторичной оптики для светодиодов на основе линз с эффектом полного внутреннего отражения / Г. Э. Романова, П. С. Чечуров. // Изв. вузов приборостроение.– 2012. - Т. 55. №7. – с. 48-51.

91. Zexin Feng. Design of LED freeform optical system for road lighting with high luminance/illuminance ratio / Zexin Feng, Yi Luo, Yanjun Han. // Optics Express. Vol. 18. - 2010. - p. 22020-A2031.

92. Freeform lens design for LED collimating illumination / Jin-Jia Chen [и др.]// Optics Express. Vol. 20. - 2012. - pp. 10984-10995.

93. Л. Л. Досколович, Расчет рефлекторов для формирования диаграммы направленности в виде кривой / Л. Л. Досколович, С. Bigliatti. // Компьютерная оптика.– 2000. - т. 20. – с. 34-36.

94. Design of an optical element forming an axial line segment for efficient LAD lighting systems / Emil R. [и др.] // Optics Express. - 2013. Vol. 21. - p. 28651-28656.

95. Mikhail A. Moiseev. Design of efficient LED optics with two free-form surfaces / Mikhail A. Moiseev, Sergey V. Kravchenko, Leonid L. Doskolovich. // Optics Express. - 2014. - Vol. 22. - p. A1926-A11935.

96. Аналитический расчет преломляющих оптических элементов для формирования однопараметрических диаграмм направленности / А. Ю. Дмитриев [и др.] // Компьютерная оптика.– 2014. - т. 38. №2 – с. 207 – 212.

97. Оптимизационный метод для расчета TIR оптических элементов, включающий процедуру быстрой трассировки лучей / М. А. Моисеев [и др.] // Компьютерная оптика.– 2013. - т. 37. №1 – с. 51 - 58.

98. Асланов Э. Р. Расчет компактной оптики для формирования заданных распределений освещенности света / Э. Р. Асланов, Л. Л. Досколович, М. А. Моисеев. // Компьютерная оптика.– 2012. - т. 36. №2 – с. 227 – 234.

99. Расчет оптических элементов, работающих по принципу полного внутреннего отражения и формирующих заданные световые распределения в

круглых областях / М. А, Моисеев [и др.]// Компьютерная оптика. – 2012. - т. 36. №3. – с. 333 – 340.

100. Бегунов Б. Н. Теория оптических систем / Б. Н. Бегунов, Н. П. Заказнов. – М.: Из-во Машиностроение. - 1973. – 488 с.

101. Заказнов Н. П. Теория оптических систем / Н. П. Заказнов, С. И, Кирюшин, В. И, Кузичев. – М.: Из-во Машиностроение. - 1992 – 448 с.

102. Запрягаева Л. А. Расчет и проектирование оптических систем / Л. А, Запрягаева, И. С, Свешникова. – М.: Из-во Логос. - 2000. – 584 с. ISBN 5-88439-143-9.

103. Зоммельфельд А. Оптика / А. Зоммельфельд пер. И. В, Родникова под ред. М. А, Ильяшевич. – М.: Из-во Издательство иностранной литературы. - 1953 – 487 с.

104. Ландсберг Г. С. Оптика / Г. С, Ландсберг. – М.: Из-во ФИЗМАТЛИТ. - 2003 – 848 с. ISBN 5-9221-0314-8.

105. Бутиков Е. И. Оптика. Учебное пособие для студентов физических специальностей вузов / Е. И. Бутиков.– СПб.: Из-во Невский Диалект; БХВ-Петербург. - 2003. – 480 с.

106. Балашов А. Вторичная оптика Casclo для мощных светодиодов / А. Балашов. // Полупроводниковая светотехника. - 2011. - №6. – с. 14-16.

107. Шаракшанэ А. Об эффективности матовых светорассеивателей / А. Шаракшанэ. // Полупроводниковая светотехника. - 2014. - №1. – с. 8-10.

108. Александров П. С. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры / П. С, Александров. – СПб.: Из-во «Лань». - 2009. – 512 с.

109. Разумовский И. Т. Приборы ночного видения / И. Т, Разумовский. – СПб.: Из-во СПб ГИТМО (ТУ). - 2001. – 92 с.

110. Пат. № 120747 Российская Федерация, МПК F21S13/00. Светоизлучающий диодный модуль / Абрамов А. В. Дерягин Н. Г.; заявитель и патентообладатель ООО «Белый свет». - № 2012102869/07, заявл. 19.01.2012, опубл. 27.09.2012, Бюл. № 27. – 1 с.

111. Пат. № 2510644 Российская Федерация, МПК F21S13/00. Модульный светодиодный прожектор / Манько Н.Г., Мансуров В.А., Шапран Ф. В., Харитонов И. В., Чудиновских В. Е.; заявитель и патентообладатель АО НПО «Автоматики». - №2012134235/07, заявл. 09.08.2012, опубл. 10.04.2014, Бюл. № 10. – 8 с.

112. Никифоров С. Г. Повесть о «вечной молодости светодиодов» / С. Г. Никифоров. // Полупроводниковая светотехника. - 2010. - №4. – с. 32-36.

113. Пат. № 2539665 Российская Федерация, МПК F21S8/00 B61L5/18. Светофорная система / Манько Н.Г., Мансуров В.А., Шапран Ф. В., Харитонов И. В.; заявитель и патентообладатель АО НПО «Автоматики». - № 2012134234/11, заявл. 09.08.2012, опубл. 20.01.2015, бюл. №2. – 7 с.

114. И. В. Харитонов, Б. С. Сергеев. Светодиодные головные прожекторы локомотивов / И. В. Харитонов, Б. С. Сергеев. // Железнодорожный транспорт. – 2015. - № 12 – с. 59-60. ISSN 0044-4448.

115. ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Республике Марий Эл»: «Влияние освещенности на физиологическое состояние организма человека» [электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.12sanepid.ru/press/publications/187.html>. Беянина А.В., свободный. – Загл. с экрана.

116. ИОТ РЖД-4100612-ЦДРП-035-2012. Инструкция по охране труда монтеров ОАО «РЖД». 2012 г. – 26 с.

117. Жулькин М.Н. Оценка критериев безопасности движения локомотивов аппаратным методом: дис. канд. техн. наук: 05.22.07 / Жулькин Михаил Николаевич. – Р. н/Д., 2001. – 157с.

118. СТН Ц-01-95. Строительно-технические нормы министерства путей сообщения Российской Федерации. Железные дороги колеи 1520 мм. М.: - 1995. – 230 с.

119. ОСН 3.02.01-97. Отраслевые строительные нормы. Нормы и правила проектирования отвода земель для железных дорог. М.: - 1997. – 51 с.

120. Ларкин С.Е. Адаптивная система освещения / С. Е, Ларкин, С. П, Сальников. // Материалы международной научно-технической конференции ААИ

«Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров». - 2010. – т 3. - с. 65-68.

121. Новаковский Л. Г. Адаптивные системы освещения / Л. Г. Новаковский // Светотехника. - 2010. - №5. – с. 23-31.

122. Пат. 2139470 Российская Федерация, МПК F21M3/08. Поворотное полипрожекторное устройство рельсового подвижного состава / Вейцель О.О., Гулин С.А. заявитель и патентообладатель Петербургский государственный институт путей сообщения, Вейцель О.О., Гулин С.А. - № 97119350/09; заявл. 26.11.1997; опубл. 10.10.1999.

123. Козловский В. Н. Надежность системы электрооборудования легкового автомобиля / В. Н. Козловский, В. Е. Ютт. // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2008. - №3. – с. 37-40. ISSN: 182-6782.

124. Пат. № 157732 Российская Федерация, МПК B60Q 1/06. Прожектор локомотива железнодорожного транспорта / Манько Н.Г., Мансуров В.А., Харитонов И.В.; заявитель и патентообладатель АО НПО «Автоматики». - № 2014119661/11, заявл. 15.05.20174, опубл. 10.12.2015, бюл. №34. – 2 с.

125. Прытков С. В. Исследования и расчёт оптических систем световых приборов на основе светодиодов: дис. канд. техн. наук: 05.09.07 / Прытков Сергей Владимирович. - Саранск. 2014 – 155 с.

126. Ашурков, С.Г. Метод расчёта фотометрического тела излучателей со светодиодами разной пространственной ориентации / С.Г. Ашурков, А.А. Барцев // Светотехника. – 2007. – №1. – с. 43–44.

127. Двайт Г. Б. Таблицы интегралов / Г. Б. Двайт. СПб: «Издательство и типография АО ВНИИГ им. Б. В. Веденеева». - 1995. - 176 с. ISBN 5-85529-029-8.

128. CREE [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.cree.com>, свободный. – Загл. с экрана.

129. И. Повилайтене. Влияние геометрических параметров железнодорожного пути в кривых на боковой износ наружного рельса / И. Повилайтене, К. Сакалаускас, И. Подагелис. // Science and Transport Progress.

Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. - 2004. №3. – с. 46-49.

130. Спутниковые навигационные системы. М.: Из-во МАИ каф. 604, 2004. — 336 с.

131. CNews. Аналитика: GPS-гонка: России не хватает спутников. [электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.cnews.ru/reviews/index.shtml?2003/06/04/144948>, свободный. – Загл. с экрана.

132. Лёвин Б. А. К истории тепловизионного мониторинга наземной обстановки /Б. А. Лёвин, Ю. М. Иньков, И. В. Бочаров // Мир транспорта. – 2014. - № 3 (52). – с. 230-237. ISSN: 1992-3252.

133. Янковский А. А. Критерии выбора метода бинаризации при обработке изображений лабораторных анализов/ А.А. Янковский, А. Н. Бугрий // Автоматизированные системы управления и приоры автоматики. - 2010. - № 3 Харьков: Из-во ХНУРЕ. – 90 с. ISSN 0135-1710

134. Otsu, N., A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms / Otsu, N., A. // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, - 1979. Vol. 9, No. 1. p. 62-66

135. Методы компьютерной обработки изображений. Под ред. В.А. Сойфера. – М.: Из-во ФИЗМАТЛИТ. - 2003. – 784 с. ISBN: 5-9221-0270-2.

136. М. А, Кудрина. Использование преобразования Хафа для обнаружения прямых линий и окружностей на изображении - М. А, Кудрина. // Изв. Самарского научного центра РАН. т. 16. №4 – 2014. – с. 476-478.

137. Дмитриев А. Л. Полупроводниковые источники света для систем передачи и обработки информации / А. Л. Дмитриев. – СПб. : Из-во СПбГУИТМО. - 2006. – 48 с.

138. Элементы и устройства оптоэлектроники. Ульяновск: Из-во УлГТУ. 2003. - 125 с.

139. И. Ошурков. Обоснованный подход к нормативам пульсаций светодиодного освещения / И. Ошурков // Современная электроника. - 2013. -№4 - с. 68 – 71.

140. Заявка на пат. РФ № 2014120393/07 МПК В60Q 1/06. Проектор локомотива железнодорожного транспорта. Манько Н.Г., Мансуров В.А., Харитонов И.В. опубл. 27.11.15, Бюл. №33. – 1 с.

141. Пат. № 2563587 Российская Федерация, МПК В60Q 1/06. Приемо-передающее устройство / Манько Н.Г., Мансуров В.А., Харитонов И.В. заявитель и патентообладатель АО НПО «Автоматики». -№ 201412039/07; заявл. 30.05.14; опубл. 25.08.15, Бюл. № 26. – 1 с.

142. Вишневский В. М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей / В.М. Вишневский. - М.: Из-во Техносфера. - 2003. – 512 с.

143. Харитонов И. В. Повышение безопасности движения локомотива в кривых / И. В. Харитонов, Б. С. Сергеев. // Транспорт Урала. – 2015. - № 2 – с. 87-91. ISSN 1815-9400.

ПРИЛОЖЕНИЕ А  
(обязательное)

ДОКУМЕНТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

## ООО «ГОРИЗОНТ»

ИНН/КПП 6662001293/667201001      р/с 40 702 810 316 480 100 020  
 620075 г. Екатеринбург,              Уральский банк Сбербанка РФ  
 ул. Мамина-Сибиряка145,              БИК 046577674  
 оф.6424,а/я31                              к/с 30 101 810 500 000 000 674  
 тел./ факс. (343)355-93-83  
 E-mail: [horizont@horizont.e-burg.ru](mailto:horizont@horizont.e-burg.ru)

№ 2/417/01 от 08.12.2015



УТВЕРЖДАЮ  
 Директор ООО «Горизонт»  
 В.А. Алгазин

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы  
 Харитонов Игоря Владимировича

Комиссия в составе: председатель главный конструктор В.Л. Булатов; члены комиссии зам. главного инженера И.Ю. Костяев; конструктор Л.Г. Петрова составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Повышение безопасности движения поездов за счет применения устройств оптоэлектроники локомотива на основе светодиодов», представленной на соискание ученой степени, использованы при разработке систем внешнего и внутреннего освещения локомотивов.

Корректность проведенного в диссертационной работе исследования подтверждается положительными результатами заводских и приемочных испытаний.

Председатель комиссии \_\_\_\_\_ В.Л. Булатов

Члены комиссии \_\_\_\_\_ И.Ю. Костяев

\_\_\_\_\_ Л.Г. Петрова



**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ АВТОМАТИКИ  
имени академика Н.А.Семихатова**

Мамина-Сибиряка ул., д.145, г. Екатеринбург, 620075, тел.: (343) 355-95-25, факс: 263-76-26. E-mail: avt@npoa.ru  
ОКПО 07533030 ОГРН 1146685026509, ИНН 6685066917, КПП 668501001. Телетайп 221276 MEZON RU.

18.12.15 № 050/1495



УТВЕРЖДАЮ  
Генеральный директор  
АО НПО «Автоматики»  
*Л.Н. Шалимов*

**АКТ**

о внедрении результатов диссертационной работы  
Харитонов Игоря Владимировича

Комиссия в составе: председатель директор филиала АО НПОА «ОКБ Автоматики» Н.Г. Манько; члены комиссии начальник отдела 051 С.Г. Подосенов; начальник сектора 0512 А.М. Мерцалов; составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Повышение безопасности движения поездов за счет применения устройств оптоэлектроники локомотива на основе светодиодов», представленной на соискание ученой степени, использованы при разработке модульных кабин управления на нескольких сериях различных типов локомотивов: 2ЭС10, ТЭМ9Н, ТЭМ31М, ТЭМ2, ТГМ4Б, 2ЭС7 (11201), ТЭ8. Всего было выпущено более 200 локомотивов.

Работоспособность и достоверность устройств, разработанных Харитоновым И.В., анализ которых выполнен в его диссертационной работе, подтверждается их опытной эксплуатацией на ряде железных дорог на протяжении более 4 лет.

Председатель комиссии *Н.Г. Манько* Н.Г. Манько

Члены комиссии *С.Г. Подосенов* С.Г. Подосенов

*А.М. Мерцалов* А.М. Мерцалов

М. В. Попов  
(343)355-95-25