



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Лысьвенский филиал федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

на тему: «Реконструкция системы электроснабжения освещения
логического центра»

студента группы ЭС9-22-1СПО по специальности
13.02.07 «Электроснабжение (по отраслям)»

Климов Константин Сергеевич

Руководитель работы (проекта): Корпукович В.В. _____ \

Консультант по организационно - экономической части: Стругова Л.А.
_____ \

Консультант по промышленной экологии и охране труда: Торощин А.К.
_____ \

Рецензент: _____ \

Допуск к защите: Торощин А.К. _____ \

Нормоконтроль: Торощин А.К. _____ \

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	2
1. ИСЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЧАСТЬ	5
1.1 Характеристика объекта и существующей системы освещения	5
1.1.1 Краткие сведения о логистическом центре ООО «Лысьваннефтемаш»: ...	5
1.1.2 Описание действующей системы освещения до реконструкции	7
1.1.3 Выявленные недостатки существующей системы	10
1.2 Современные источники искусственного освещения	13
1.2.1 Сравнительный анализ типов ламп	13
1.2.2 Конструктивные особенности промышленных LED-светильников	15
1.2.3 Нормативная база	18
1.3 Автоматизированные системы управления освещением	21
1.3.1 Принципы построения систем автоматического управления	21
1.3.2 Программируемые логические контроллеры ОВЕН	23
1.3.3 Датчики и исполнительные устройства в составе АСУО	26
2. КОНСТРУКТОРСКАЯ ЧАСТЬ	29
2.1 Анализ объекта и выбор светотехнического оборудования	29
2.1.1 Зонирование логистического центра	29
2.1.2 Сравнительный анализ и выбор LED-светильника	31
2.1.3 Сравнение технических предложений по системе управления	33
2.2 Светотехнический расчет	36
2.2.1 Расчет освещенности	36
2.2.2 Расчет для служебно-бытовой части	39
2.2.3 Проверочный расчет точечным методом	43
2.3 Электрический расчет и проектирование системы управления	47
2.3.1 Расчет электрических нагрузок	47
2.3.2 Выбор марки и сечения питающих кабелей	52
2.3.3 Разработка схемы автоматического управления	58
3. ОХРАНА ТРУДА И ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭКОЛОГИЯ	63
3.1. Санитарно-гигиенические требования к параметрам освещения	63

3.1.1 Нормируемые санитарно-гигиенические	63
3.1.2 Влияние параметров освещения на работоспособность и здоровье	65
3.1.3 Периодический контроль параметров освещения на рабочих местах	67
3.2 Безопасные методы и организация работ на высоте	70
3.2.1 Нормативные требования и организация работ на высоте	70
3.2.2 Средства индивидуальной защиты при работе	72
3.2.3 Электробезопасность при монтаже	74
3.3 Экологические аспекты применения светодиодного освещения	76
3.3.1 Экологические риски при выводе из эксплуатации ламп ДРЛ	76
3.3.2 Сравнение экологического профиля	78
3.3.3 Соответствие реконструкции требованиям энергетического законодательства	80
4. ОРГАНИЗАЦИОННО - ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	83
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	87
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	89

ВВЕДЕНИЕ

Освещение производственного объекта – это инженерная система, от которой напрямую зависят безопасность персонала, производительность труда и статья расходов на электроэнергию. Когда светильник потребляет 400 ватт, не реагирует на время суток и горит круглосуточно вне зависимости от того, светло на улице или нет – это уже не просто техническая проблема, это управленческий и экономический вызов для предприятия.

Именно с такой ситуацией столкнулся логистический центр ООО «Лысьваннефтемаш» – крупного производителя погружного нефтяного оборудования, входящего в холдинг «ПК Борец». На протяжении многих лет освещение логистического центра (ЛЦ) обеспечивалось светильниками типа РСП-05 с дуговыми ртутными лампами ДРЛ-400. Каждый такой светильник потреблял 400 Вт, имел световую отдачу около 55–60 лм/Вт, требовал значительного времени на разгорание и содержал пары ртути – что само по себе создает дополнительные требования к утилизации. Никакой автоматики предусмотрено не было: свет включался утром и выключался вечером – если вообще выключался. Контроль за режимом работы освещения фактически отсутствовал, а расходы на электроэнергию год за годом оставались на высоком уровне.

В последние годы на предприятии началась планомерная замена устаревших светильников на светодиодные. Этот шаг дал ощутимый результат: светодиодные источники при мощности 150 Вт обеспечивают световой поток порядка 27 000 лм, что при световой отдаче свыше 175 лм/Вт более чем втрое превосходит показатели ДРЛ-400. Срок службы LED-светильника составляет не менее 50 000 часов против 12 000–15 000 у ДРЛ. Однако замена «железа» – это только половина задачи. Без системы автоматического управления новые светильники продолжают гореть в светлое время суток, сокращая собственный ресурс и потребляя киловатты впустую.

Актуальность настоящего диплома определяется тремя факторами. Во-первых, энергетическая составляющая в себестоимости промышленного производства неуклонно растет, и сокращение потребления электроэнергии на освещение – один из немногих резервов, который можно реализовать относительно быстро и с предсказуемым экономическим эффектом. Во-вторых, переход от ручного к автоматическому управлению освещением на базе современных программируемых контроллеров стал доступен даже для объектов среднего масштаба: отечественные контроллеры ОВЕН обеспечивают весь необходимый функционал при разумной стоимости и развитой технической поддержке. В-третьих, завершение реконструкции освещения ЛЦ – это реальная производственная задача, стоящая перед предприятием прямо сейчас, а не абстрактный учебный пример.

Цель дипломной работы – разработать проект реконструкции системы электроснабжения освещения логистического центра ООО «Лысьваннефтемаш» с переходом на светодиодные светильники и внедрением автоматизированного управления на базе контроллеров ОВЕН.

Объект дипломной работы – система освещения логистического центра ООО «Лысьваннефтемаш», расположенного в одноэтажном производственном здании площадью 5 400 м² с трехэтажной служебно-бытовой частью.

Предмет дипломной работы – технические решения по замене светильников РСП-05/ДРЛ-400 на светодиодные и по внедрению автоматизированной системы управления освещением на базе программируемых контроллеров ОВЕН с датчиками освещенности.

Научная новизна работы состоит в том, что впервые для логистического центра ООО «Лысьваннефтемаш» разработан комплексный проект реконструкции освещения, объединяющий замену светисточников и внедрение многозонной системы автоматического управления с применением отечественной элементной базы ОВЕН. Предложенное решение учитывает специфику объекта: высоту подвеса светильников,

зонирование помещений по назначению и действующую схему питающих кабельных линий.

Практическая значимость диплома определяется его прикладным характером: разработанный проект может быть непосредственно использован службой главного энергетика ООО «Лысьваннефтемаш» при проведении реконструкции. Рассчитанные показатели экономической эффективности подтверждают целесообразность вложений: снижение установленной мощности освещения более чем в 2,5 раза в сочетании с автоматическим отключением в светлое время суток позволит сократить расходы на электроэнергию не менее чем на 30% и окупить затраты в течение приемлемого срока.

1. ИСЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЧАСТЬ

1.1 Характеристика объекта и существующей системы освещения

1.1.1 Краткие сведения о логистическом центре ООО «Лысьванефтемаш»:

ООО «Лысьвенский завод нефтяного машиностроения» – предприятие, которое сложно назвать рядовым провинциальным заводом. Расположенное в городе Лысьва Пермского края, оно входит в состав одного из крупнейших в мире производителей погружного насосного оборудования для добычи нефти – холдинга «Производственная компания Борец». Холдинг занимает около 15% мирового рынка и порядка 37% российского рынка в сегменте установок электроцентробежных насосов. За этими цифрами стоят тысячи нефтяных скважин по всей стране и за рубежом, работающих в том числе на оборудовании, произведенном в Лысьве.

История завода началась с небольшого участка по выпуску водонаполненных электродвигателей в составе завода «Привод». В 1992 году на этой базе было создано производство погружных электроустановок, а в 2006 году оно получило юридическую самостоятельность – так появился «Лысьванефтемаш». С тех пор предприятие пережило масштабную техническую модернизацию: производственные площади расширились до 34 тысяч квадратных метров, из Москвы были переданы технологии и перевезено более 400 единиц оборудования. Специализация завода – протекторы, погружные электродвигатели и датчики. Около 85% продукции реализуется на российском рынке, 15% идет на экспорт.

В 2012 году на территории завода был открыт логистический центр холдинга «ПК Борец» – ключевое звено в системе хранения и отгрузки готовой продукции и комплектующих. Именно этот объект рассматривается в дипломе.

Логистический центр (далее – ЛЦ) расположен в отдельном здании на территории предприятия. По своей конструкции это промышленный корпус советской постройки – год возведения здания, согласно паспорту, датируется

декабрем 1979 года. Несмотря на возраст, здание эксплуатируется в штатном режиме.

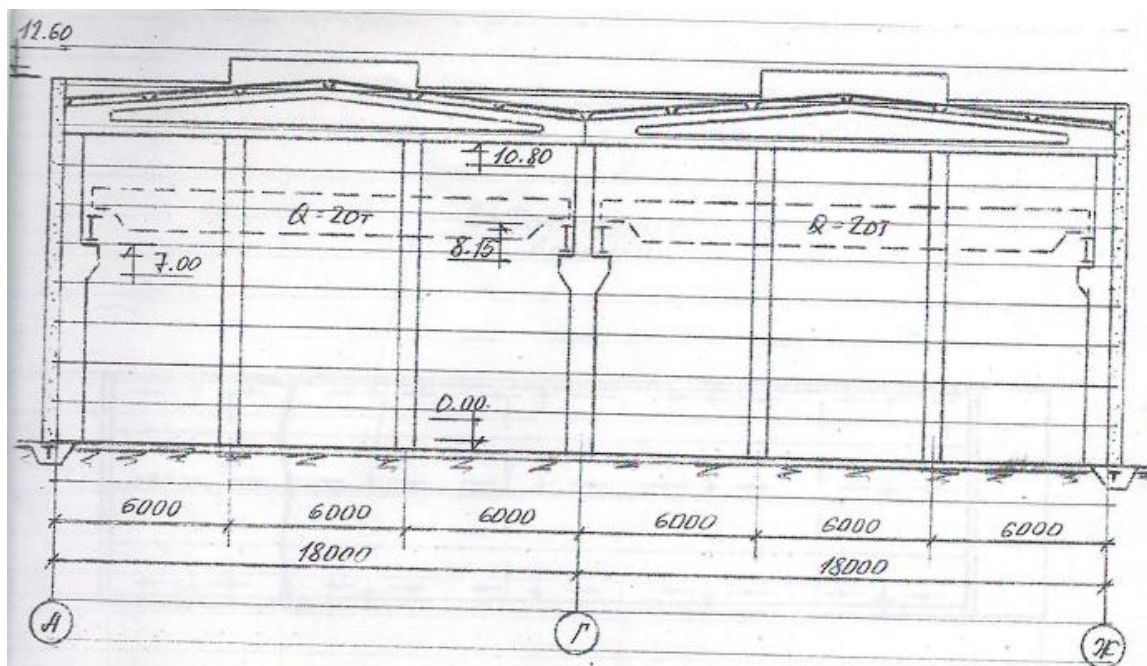


Рисунок 1 – Схематический поперечный разрез здания

Производственная часть здания одноэтажная, служебно-бытовая выполнена в три этажа. Общая площадь застройки составляет 5 733 м², из которых на производственную (складскую) часть приходится 5 400 м², на служебно-бытовую – 333 м². Строительный объем здания – 68 297,6 м³. Перед проектировщиком системы освещения стоит задача работы с крупным одноэтажным объемом и трехэтажной пристройкой, требующей принципиально иных световых норм и схем расстановки светильников.

Схематический поперечный разрез здания показывает два основных пролета шириной по 18 000 мм каждый с шагом колонн 6 000 мм. Высота низа стропильных ферм – 10,80 м, отметка конька кровли – 12,60 м. В здании предусмотрены мостовые краны грузоподъемностью $Q = 20$ т с отметкой крановых путей 7,00–8,15 м. Это существенный момент для проекта освещения: подвес светильников ограничен геометрией кранового хозяйства, а обслуживание светоточек возможно только с крановых тележек или с применением подъемных механизмов.

Полы в производственной части бетонные (5 588 м²), что типично для складских помещений с интенсивным движением напольного транспорта. Площадь стен за вычетом проемов составляет 3 735 м², площадь стеновых светопроемов – 1 146,6 м². Кровля преимущественно мягкая (5 400 м²), водоотвод внутренний, через водосточные воронки.

Экспликация помещений фиксирует состав всех зон ЛЦ: основной складской пролет, зоны приемки и отгрузки у ворот, служебные помещения трехэтажной пристройки (кабинеты, коридоры, санузлы, гардеробные), технические помещения. Каждая зона имеет собственные нормативные требования к освещенности, цветовой температуре и равномерности светового поля, что определяет необходимость зонального подхода к проектированию системы управления освещением.

Режим работы логистического центра – многосменный, с элементами круглосуточной деятельности в периоды пиковой отгрузки. Это означает, что система освещения должна быть не просто энергоэффективной, но и гибкой: в одни часы требуется полная мощность всех групп, в другие – достаточно дежурного уровня или автоматического отключения при достаточном естественном освещении через боковые светопроемы.

Большая площадь, значительная высота, крановое оборудование, разнородный состав помещений и многосменный режим – все это формирует граничные условия для расчетов, к которым диплом переходит ниже.

1.1.2 Описание действующей системы освещения до реконструкции

Чтобы обосновать необходимость реконструкции, недостаточно просто сказать «старые светильники – плохо, новые – хорошо». Нужно разобраться, что именно установлено в логистическом центре, как это работает и почему сложившаяся ситуация стала отправной точкой для разработки настоящего диплома.

До начала реконструкции освещение основного складского пролета ЛЦ обеспечивалось светильниками типа РСП-05 с дуговыми ртутными лампами

высокого давления ДРЛ-400. РСП-05 – подвесной промышленный светильник с куполообразным отражателем, рассчитанный на лампы типа ДРЛ мощностью от 250 до 700 Вт. Конструктивно он представляет собой стальной штампованный корпус с зеркальным отражателем, стеклянным рассеивателем и патроном Е40. Степень защиты оболочки – IP23, что обеспечивает лишь минимальную защиту от капель воды. Для складского помещения с интенсивной эксплуатацией и запыленностью этот класс находится на пределе допустимого.

Лампа ДРЛ-400 работает на принципе газового разряда в парах ртути высокого давления. Колба покрыта изнутри люминофором, преобразующим ультрафиолетовое излучение в видимый свет. Номинальная мощность – 400 Вт, световой поток – около 22 000–24 000 лм, световая отдача – порядка 55–60 лм/Вт. Индекс цветопередачи Ra – около 45: цвета при таком освещении воспринимаются искаженно, зрительное утомление наступает быстрее. Срок службы по паспорту – 12 000–15 000 часов, однако в условиях промышленного объекта с частыми коммутациями реальный ресурс оказывается ниже. Принципиальный недостаток – время разгорания: после включения лампа выходит на номинальный световой поток за 5–7 минут, а после аварийного отключения требует полного остывания – до 15 минут. Это делает ДРЛ-400 практически непригодной для систем автоматического управления.

Служебно-бытовая часть ЛЦ оснащена светильниками с люминесцентными лампами типа Т8 (36 Вт) в корпусах ЛСП или ОДР. Лампы Т8 содержат ртуть, чувствительны к низким температурам, дают заметную пульсацию светового потока на электромагнитных пускорегулирующих аппаратах, а их ресурс составляет 10 000–15 000 часов.

Схема электроснабжения осветительной сети ЛЦ построена от щитов освещения (ЩО), установленных в нескольких точках здания. Группы освещения разведены по зонам: основной пролет, пристройка по этажам, зоны ворот. Управление – полностью ручное: включение и выключение

производится мастерами участков через выключатели в ЩО. Никакой автоматики, датчиков освещенности или таймерных схем в существующей системе не предусмотрено. На практике освещение работает в течение всего рабочего дня вне зависимости от уровня естественного света, поступающего через боковые светопроемы площадью 1 146,6 м².

Для наглядного сопоставления характеристик оборудования обеих зон здания ниже приведена сводная таблица.

Таблица 1 – Характеристики осветительного оборудования ЛЦ до реконструкции

Параметр	РСП-05 / ДРЛ-400 (пролет)	ЛСП / Т8-36 (пристройка)
Тип светильника	РСП-05	ЛСП (ОДР)
Тип лампы	ДРЛ-400	Люминесцентная Т8
Мощность лампы, Вт	400	36 (2×36 = 72)
Световой поток, лм	22 000–24 000	6 700
Световая отдача, лм/Вт	55–60	~93
Цветовая температура, К	3 800–4 200	4 000–6 500
Индекс цветопередачи Ra	~45	~80
Срок службы, ч	12 000–15 000	10 000–15 000
Время разгорания	5–7 мин	мгновенное
Содержание ртути	да	да
Степень защиты IP	IP23	IP20–IP40
Возможность диммирования	нет	нет
Управление	ручное	ручное

Световая отдача ДРЛ-400 на уровне 55–60 лм/Вт – один из самых низких показателей среди источников света, применяемых в промышленности сегодня. Светодиодные светильники класса «High Bay» мощностью 150 Вт обеспечивают световой поток 27 000–28 000 лм при отдаче 175–186 лм/Вт. При замене ДРЛ-400 на LED-150 потребляемая мощность одной светоточки снижается в 2,67 раза при равном или большем

световом потоке. При нескольких десятках светильников в пролете суммарный эффект оказывается весомым.

Не менее серьезная проблема – полное отсутствие автоматики. По оценкам, зафиксированным во внутреннем предложении по улучшению, подготовленном сотрудниками предприятия, введение управления по датчику освещенности позволяет сократить время работы осветительной установки на 9 часов в сутки в летний период. В пересчете на год это дает экономию порядка 30% от общего потребления электроэнергии на освещение – только за счет автоматики, без учета эффекта от замены ламп.

Оба фактора – устаревшие источники света и отсутствие автоматики – и служат основанием для реконструкции.

1.1.3 Выявленные недостатки существующей системы

Описание действующего оборудования само по себе еще не дает полной картины проблемы. Чтобы она сложилась, нужно перейти от характеристик к последствиям – понять, что конкретно происходит с энергопотреблением, сроками службы и условиями труда при эксплуатации устаревшей системы в том режиме, в котором она работает сегодня.

Первый и наиболее очевидный недостаток – избыточное энергопотребление. Полное потребление светильника РСП-05 с учетом потерь в дросселе составляет порядка 430–450 Вт на точку. Если принять, что в основном пролете ЛЦ установлено 60 светильников, суммарная установленная мощность составит около 27 кВт. При работе 16 часов в сутки и 350 рабочих дней в год потребление достигнет 151 200 кВт·ч/год. При тарифе 7 руб/кВт·ч годовые затраты на освещение только основного пролета превысят 1 000 000 рублей – и это с учетом того, что в светлое время суток искусственное освещение продолжает гореть при достаточном естественном свете через боковые светопроемы площадью 1 146,6 м².

Второй недостаток – низкое качество светового потока. Индекс цветопередачи $R_a \approx 45$ у ламп ДРЛ-400 означает, что освещение грубо

искажает восприятие цвета. В условиях склада, где персонал работает с маркировкой и цветовой кодировкой продукции, это фактор, снижающий точность работы и увеличивающий вероятность ошибок. Коэффициент пульсации у ДРЛ-400 на частоте 100 Гц достигает 65–70%, что значительно превышает допустимые нормы (не более 20% для складских помещений по СП 52.13330). Длительное воздействие пульсации приводит к зрительному утомлению и снижению концентрации.

Третий недостаток – высокие затраты на обслуживание. Заявленный срок службы ДРЛ-400 составляет 12 000–15 000 часов. При режиме работы 16 ч/сут замена потребуется через 2,0–2,6 года. В условиях промышленной эксплуатации с перепадами напряжения и вибрациями от кранового оборудования фактический срок оказывается еще короче. Замена лампы в светильнике, подвешенном на высоте 10–12 м в зоне кранового пролета, требует привлечения крановщика, наряда-допуска и остановки грузоподъемного оборудования. Стоимость одного обслуживания с учетом трудозатрат многократно превышает цену самой лампы.

Четвертый недостаток – экологическая нагрузка. Каждая лампа ДРЛ-400 содержит от 30 до 100 мг ртути. При нескольких десятках светильников в пролете и периодичности замены раз в 2–3 года через утилизацию проходит значительное количество ртутьсодержащих отходов, требующих специализированной переработки. Нарушение порядка обращения с такими отходами влечет административную ответственность по КоАП РФ.

Пятый недостаток – полное отсутствие управляемости. При ручном управлении освещение неизбежно горит впустую: в периоды достаточной естественной освещенности, при неполной загрузке зон склада, в перерывах. Система работает по принципу «включил утром – выключил вечером», что в корне противоречит логике энергосбережения.

Все перечисленные недостатки поддаются количественной оценке. Особенно наглядно разрыв между существующим и перспективным оборудованием виден при прямом сравнении ключевых параметров. Для

визуализации этого разрыва данные сведены в таблицу, пригодную для построения сравнительной гистограммы.

Таблица 2 – Сравнение ключевых характеристик ДРЛ-400 и LED-150

Параметр	ДРЛ-400 (старый)	LED-150 (новый)	Эффект
Мощность	400 Вт	150 Вт	↓ в 2,7 раза
Световой поток	~23 000 лм	~27 000 лм	↑ на 17%
Срок службы	12-15 тыс. ч	50 000+ ч	↑ в 4 раза
Пульсация	65-70% (вредно)	<5%	Соответствие СанПиН
Экология	Ртуть (I класс)	Безопасен (IV класс)	+

Таблица фиксирует разрыв по пяти показателям одновременно. Особенно разителен контраст по мощности (400 Вт против 150 Вт) и световой отдаче (58 против 180 лм/Вт): новый светильник потребляет в 2,67 раза меньше, отдавая при этом в 3 раза больше света на каждый ватт. Срок службы вырастает почти в четыре раза – с 13 000 до 50 000 часов, что при сложности обслуживания на высоте 10–12 м означает кратное снижение эксплуатационных затрат. Коэффициент пульсации снижается с недопустимых 67% до практически нулевых 5%. Индекс цветопередачи вырастает с 45 до 70 – минимального значения, при котором цветовосприятие считается приемлемым для производственных помещений по действующим нормам.

Все пять недостатков взаимосвязаны: без полноценной реконструкции устранить их по отдельности не получится.

1.2 Современные источники искусственного освещения для промышленных объектов

1.2.1 Сравнительный анализ типов ламп

Выбор типа источника света для промышленного объекта – это не вопрос вкуса или моды. За ним стоят конкретные технические расчеты, нормативные требования и понимание условий эксплуатации. В этом подразделе рассматриваются основные типы ламп, которые использовались и используются сегодня в промышленном освещении, выявляются их сильные и слабые стороны, а в итоге обосновывается выбор светодиодных источников как единственного технически грамотного решения для реконструкции освещения логистического центра.

Дуговые ртутные лампы высокого давления (ДРЛ) – тот самый тип источников света, с которого началась история объекта. Принцип работы: электрический разряд в парах ртути возбуждает атомы, которые при возвращении в основное состояние излучают преимущественно в ультрафиолетовом диапазоне; люминофор, нанесенный на колбу, преобразует УФ-излучение в видимый свет. Мощность стандартных ламп для промышленного освещения – от 250 до 700 Вт. Световая отдача – 55–70 лм/Вт, индекс цветопередачи Ra – 40–55, цветовая температура – 3800–4200 К, срок службы – 12 000–15 000 часов по паспорту. Основные недостатки: время разгорания – 5–7 минут, необходимость полного остывания перед повторным включением, высокое содержание ртути, высокий коэффициент пульсации. На протяжении десятилетий прожекторные лампы оставались безальтернативным решением для больших высотных пролетов – просто потому, что ничего лучше в доступном ценовом диапазоне не было.

Дуговые натриевые лампы высокого давления (ДНаТ) – следующий этап эволюции. Разряд в парах натрия обеспечивает световую отдачу 100–130 лм/Вт для ламп мощностью 250–400 Вт, а срок службы составляет 16 000–24 000 часов. Однако индекс цветопередачи Ra у стандартных ламп ДНаТ

составляет всего 20–25: характерный желто-оранжевый оттенок света делает невозможным нормальное цветоразличение. Существуют улучшенные варианты с индексом цветопередачи Ra 60–85, но их световая отдача падает до 80–90 лм/Вт, а стоимость существенно возрастает. ДНаТ, как и ДРЛ, содержат ртуть, требуют пускорегулирующей аппаратуры и имеют высокий коэффициент пульсации. Применение стандартных ДНаТ в складских помещениях, где важно правильно распознавать маркировку и цветовые коды, нормативно ограничено.

Металлогалогенные лампы (МГЛ) стали серьезным прорывом в сегменте промышленного освещения. Добавление галогенидов металлов в разрядную трубку позволило добиться световой отдачи 80–110 лм/Вт при индексе цветопередачи Ra 80–95 – значительно лучше, чем у ДРЛ и ДНаТ. Цветовая температура – 3000–6500 К, срок службы – 10 000–20 000 часов. Тем не менее металлогалогенные лампы также требуют времени на разгорание (3–5 минут) и остывание перед повторным включением, содержат ртуть и имеют высокий коэффициент пульсации. Применение металлогалогенных ламп в системах с автоматическим управлением по датчикам освещенности крайне затруднительно именно из-за невозможности быстрого повторного включения.

Светодиодные источники света (LED) принципиально отличаются от всех рассмотренных типов по принципу работы. Свет генерируется за счет явления электролюминесценции в полупроводниковом кристалле при прохождении через него тока – без разряда, без нагрева нити, без ртути. Это кардинально меняет эксплуатационные характеристики. Современные промышленные светодиодные светильники класса High Bay на кристаллах Bridgelux обеспечивают светоотдачу 175–186 лм/Вт при мощности 150 Вт – втрое выше, чем у ДРЛ-400. Световой поток составляет 27 000–28 000 лм, что сопоставимо или превышает световой поток ДРЛ-400 при потреблении 400 Вт. Ra $\geq$ 70, цветовая температура 5000 К, коэффициент пульсации менее 5%. Степень защиты – IP67: полная защита от пыли и устойчивость к струе

воды, что принципиально лучше, чем у РСП-05 со степенью защиты IP23. Диапазон рабочих температур от -50°C до $+50^{\circ}\text{C}$ позволяет использовать такие светильники в неотапливаемых складских помещениях. Срок службы – не менее 50 000 часов: при работе 16 часов в сутки светильник прослужит без замены более 8,5 лет.

Принципиально важно, что светодиодные светильники включаются мгновенно, без периода разгорания, и допускают диммирование через интерфейс 0–10 В или DALI. Это делает их полностью совместимыми с системами автоматического управления на базе контроллеров ОВЕН. Такого качества нет ни у одного из рассмотренных выше типов газоразрядных ламп.

Все рассмотренные альтернативы проигрывают светодиодам по светоотдаче, сроку службы, совместимости с автоматикой и экологической безопасности. Переход на LED – единственное технически обоснованное решение для данного объекта.

1.2.2 Конструктивные особенности промышленных LED-светильников типа «High Bay» (подвесные купольные)

После принятия принципиального решения о переходе на светодиодное освещение возникает следующий вопрос: какой именно светильник выбрать. Рынок промышленных светодиодных светильников сегодня переполнен предложениями – от откровенно дешевых изделий с минимальным ресурсом до высококлассных решений с гарантийным сроком 5 лет и светоотдачей более 180 лм/Вт. Чтобы сделать обоснованный выбор, необходимо сначала разобраться в конструкции и ключевых параметрах светильников класса High Bay, а затем сравнить конкретные модели, предлагаемые поставщиками.

Термин High Bay обозначает класс подвесных промышленных светильников для помещений с высотой подвеса от 6 до 20 метров – именно такой диапазон характерен для складских корпусов, в том числе для логистических центров с высотой низа ферм 10,80 м. Конструктивно светильники этого класса выпускаются в двух основных исполнениях:

круглом куполообразном («UFO») и линейном. Для высотных пролетов с подвесом 8–12 м наиболее распространено куполообразное исполнение с косинусной кривой силы света – оно обеспечивает концентрированный световой поток строго вниз с углом излучения 60–120°, что сводит к минимуму потери на засветку стен и перекрытий.

Подвесной светодиодный светильник UFO High Bay конструктивно состоит из нескольких ключевых элементов. Корпус и радиатор охлаждения выполнены из литого алюминия – высокая теплопроводность обеспечивает эффективный отвод тепла от светодиодной матрицы, что напрямую влияет на срок службы кристаллов. Светодиодная матрица монтируется на металлической подложке (MCPCB). Качество кристаллов – ключевой критерий надежности: ведущие производители используют чипы Bridgelux (США), Osram или Cree. Линза формирует нужную кривую силы света: для складских пролетов стандартной высоты оптимален угол 120° (косинусная КСС). Драйвер преобразует сетевое напряжение в стабилизированный ток для питания светодиодов и обеспечивает защиту от перенапряжения и перегрева. Наличие входа 0–10 В позволяет контроллеру ОВЕН плавно регулировать световой поток от 10 до 100 % – это ключевое требование для автоматизированной системы управления.

Степень защиты корпуса – еще один критически важный параметр. IP67 означает полную защиту от пыли и кратковременного погружения в воду; IP65 – полную защиту от пыли и струи воды. Оба класса защиты принципиально лучше, чем у РСП-05 с классом IP23. Диапазон рабочих температур от –50 °С до –60 °С и ниже важен с учетом того, что складская часть логистического центра в нерабочее время зимой может не отапливаться.

В ходе подготовки проекта реконструкции были получены коммерческие предложения от нескольких поставщиков. Основными кандидатами на замену светильников РСП-05 в основном пролете стали модели мощностью 150 Вт с косинусной КСС и углом рассеивания 120°. Их характеристики сведены в таблицу для сравнительного анализа.

Таблица 3 – Технические характеристики светодиодных светильников, которые могут заменить РСП-05/ДРЛ-400

Параметр	THOR 150 K120 IP65	ELS NEO Lite 150	ELS NEO 150L	Борец Профи Нео 150
Мощность, Вт	150	150	150	150
Световой поток, лм	27 770	27 000	27 900	н/д
Световая отдача, лм/Вт	185	180	186	н/д
Цветовая температура, К	5 000	5 000	5 000	5 000
Угол излучения, °	120	120	120	120
Производитель чипов	–	Bridgelux	Bridgelux	–
Индекс цветопередачи CRI	≥70	≥70	≥70	≥70
Степень защиты IP	IP65	IP67	IP67	н/д
Диапазон температур, °С	–40...+50	–50...+50	–60...+50	н/д
Гарантийный срок, лет	5	5	5	н/д
Цена с НДС, руб.	по КП	14 300	17 400	по КП

Из приведенных данных следует, что все модели принципиально сопоставимы по основным светотехническим параметрам: мощность 150 Вт, световой поток около 27 000–28 000 лм, цветовая температура 5 000 К, угол 120°, CRI ≥ 70. Разница проявляется в деталях: модели ELS имеют задокументированный производитель чипов (Bridgelux), IP67 против IP65 у THOR, расширенный нижний порог рабочих температур у NEO 150L (до –60°С). По стоимости ELS LED NEO Lite 150 при цене 14 300 руб./шт. оказывается наиболее конкурентной при полном наборе подтвержденных характеристик.

1.2.3 Нормативная база

Любой проект освещения – это прежде всего работа в рамках действующей нормативной базы, которая жестко задает минимально допустимые параметры световой среды для каждого типа помещений. Несоответствие проектного решения требованиям нормативных документов означает либо отказ в согласовании проекта, либо – что хуже – реальный вред здоровью работников. В данном подпункте рассмотрены ключевые нормативные документы, регулирующие проектирование искусственного освещения производственных и складских помещений, а также конкретные нормируемые показатели, которые должны быть выдержаны по результатам расчета.

Основным нормативным документом является СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*». Документ устанавливает требования к нормированию освещенности рабочих поверхностей, равномерности освещения, цилиндрической освещенности, показателю дискомфорта (UGR) и коэффициенту пульсации для различных видов помещений. СП 52.13330.2016 является обязательным к применению в части требований безопасности.

Параллельно действует ГОСТ Р 55710-2013 «Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерений», гармонизированный с европейским EN 12464-1. Стандарт устанавливает нормы освещенности для широкого перечня производственных помещений – от офисов до складов и цехов тяжелого машиностроения. ГОСТ Р 55710 применяется при расчете и контроле освещения на уровне рабочей поверхности (расчетная плоскость – 0,85 м от пола), вводит понятие обслуживаемой и фоновой зоны с дифференцированными нормами.

Складские помещения в СП 52.13330 относятся к разряду зрительной работы VIIa и нормируются по минимальной освещенности $E_n = 200$ лк. Для зон приемки и комплектации заказов, где ведется работа с маркировкой,

разряд повышается до IVa – $E_n = 300$ лк. По ГОСТ Р 55710-2013 для складов с постоянными рабочими местами нормируемая средняя освещенность $\bar{E}_m = 200$ лк при коэффициенте равномерности $U_0 = E_{min}/\bar{E}_m \geq 0,40$.

Для помещений служебно-бытовой части нормируемая освещенность выше: для офисных помещений с работой на компьютере – $E_n = 300\text{--}500$ лк (разряд III–IV), коридоры и лестничные клетки – $100\text{--}150$ лк.

Помимо средней освещенности, нормируются следующие параметры. Коэффициент пульсации K_p – не более 10% для административных помещений и не более 20% для складских; светодиодные светильники с K_p менее 5% выполняют это требование с запасом. Показатель дискомфорта UGR – не более 25 для складских помещений; угол излучения 120° и рекомендуемая высота подвеса обеспечивают его соблюдение. Индекс цветопередачи R_a – не менее 60 для склада по ГОСТ Р 55710; принятые светильники с $CRI \geq 70$ соответствуют этому с запасом. Цветовая температура для производственных помещений – рекомендуемый диапазон 4 000–6 500 К; светильники с 5 000 К попадают в его середину.

Отдельного внимания заслуживает нормирование коэффициента запаса K_z . В методе коэффициента использования светового потока K_z учитывает снижение светового потока из-за загрязнения и деградации. Для производственных помещений со средней концентрацией пыли и светодиодными светильниками $K_z = 1,5$ по таблице СП 52.13330.2016. Это означает, что проектируемая освещенность при новых светильниках должна превышать нормируемую в 1,5 раза: для склада – $200 \times 1,5 = 300$ лк в начальный момент эксплуатации.

Для наглядного представления нормируемых показателей по зонам ЛЦ данные сведены в таблицу.

Таблица 4 – Нормируемые показатели искусственного освещения для помещений ЛЦ по СП 52.13330.2016 и ГОСТ Р 55710-2013

Зона / помещение	Разряд зрит. работы	Ен (средняя), лк	U0, не менее	Кп, %, не более	Ra, не менее	UGR, не более
Основной складской пролет	VIIIa	200	0,4	20	60	25
Зона приемки / комплектации	IVa	300	0,4	20	80	22
Зона ворот и погрузки	VIIIa	200	0,4	20	60	25
Кабинеты, офисные помещения	III	300–500	0,6	10	80	19
Коридоры, лестницы	–	100–150	0,4	20	40	25
Санузлы, гардеробные	–	100–200	0,4	20	60	25

Приведенные нормы являются граничными условиями для светотехнического расчета во второй главе диплома. Расчет методом коэффициента использования светового потока должен подтвердить, что выбранные светильники при принятой схеме расстановки обеспечивают освещенность не ниже нормируемой по каждой зоне. Проверочный расчет точечным методом позволяет дополнительно убедиться в соответствии равномерности освещения нормативному коэффициенту U0. Проработка нормативной базы на этапе теоретического обзора позволяет в расчетной части сосредоточиться непосредственно на численных результатах, не отвлекаясь на объяснение исходных требований.

1.3 Автоматизированные системы управления освещением на базе контроллеров ОВЕН

1.3.1 Принципы построения систем автоматического управления освещением (АСУО)

Замена светильников – это важный, но все же только первый шаг реконструкции. Без системы управления новые светодиодные светильники будут работать ровно так же, как старые ДРЛ-400: включаться вручную утром и выключаться вечером, независимо от того, светло на улице или нет, есть в пролете люди или нет. Автоматизированная система управления освещением (АСУО) – это то, что превращает набор светильников в интеллектуальную установку, способную самостоятельно адаптироваться к текущим условиям и экономить электроэнергию без участия персонала.

В общем виде АСУО представляет собой комплекс технических средств, обеспечивающих автоматическое управление осветительными приборами по заданным алгоритмам. В зависимости от заложенного алгоритма система может работать принципиально по-разному. Ниже рассмотрены основные принципы и режимы управления, применяемые в современных АСУО.

Управление по уровню естественной освещенности – наиболее эффективный принцип для объектов с боковым естественным светом. Датчик освещенности непрерывно измеряет уровень в контрольной точке и передает сигнал на контроллер. Контроллер сравнивает значение с заданным порогом и либо отключает группу светильников целиком, либо плавно регулирует световой поток через интерфейс 0–10 В. Если естественного света достаточно – искусственное снижается или отключается; как только уровень падает ниже порога – включается или добавляет мощность. Для ЛЦ с площадью стеновых светопроемов 1 146,6 м² этот принцип особенно актуален: в летние месяцы в дневное время естественная освещенность в

пролете способна полностью перекрывать нормативное требование. Без автоматики все это время искусственное освещение горит вхолостую.

Управление по расписанию реализуется через встроенные часы реального времени контроллера. В памяти задаются временные программы включения и выключения групп с точностью до минуты, с возможностью разных программ для будних и выходных дней. В ночное время освещение пролета может автоматически переключаться в режим дежурного освещения с мощностью 20–30% – достаточно для прохода персонала и работы видеонаблюдения, но не полная нагрузка.

Управление по присутствию основано на сигналах от датчиков движения (PIR или микроволновых). При обнаружении движения датчик подает сигнал контроллеру, который включает соответствующую группу. Через заданный таймаут после исчезновения движения освещение гасится или переходит в режим пониженной мощности. Этот принцип эффективен для помещений с нерегулярным посещением – служебных коридоров, санузлов и подсобных помещений служебно-бытовой части ЛЦ.

Комбинированное управление объединяет несколько принципов в единый алгоритм с приоритетами. Типовой алгоритм для складского пролета: в рабочее время (07:00–19:00) система работает по датчику освещенности, поддерживая 200 лк и плавно снижая мощность по мере роста естественного света; в нерабочее время переходит в дежурный режим 20–30%; при срабатывании датчика движения в любое время включает полную мощность. Именно такой алгоритм заложен во внутреннее предложение по улучшению системы управления, разработанное сотрудниками предприятия.

По архитектуре АСУО делятся на централизованные и децентрализованные. В централизованной все группы управляются единым контроллером; в децентрализованной каждая зона имеет собственный контроллер, координация идет через сеть RS-485 по протоколу MODBUS RTU. Для ЛЦ с несколькими функциональными зонами оптимальна именно

децентрализованная архитектура с контроллерами ОВЕН и объединением в общую сеть.

По способу воздействия на нагрузку системы разделяются на релейные и диммерные. Релейное управление проще, однако не позволяет поддерживать постоянный уровень освещенности. Диммирование через интерфейс 0–10 В обеспечивает плавную регулировку от 10 до 100% без мерцания и с сохранением ресурса светильника – этот способ принят в проекте реконструкции ЛЦ.

Наконец, важно разграничить понятия САУ и АСУО. САУ – любая система управления без непосредственного участия человека. АСУО – частный случай применительно к освещению, предполагающий помимо автоматики возможность ручного вмешательства через панель или диспетчерский интерфейс. Именно АСУО с возможностью ручного переключения и мониторинга является проектным решением для логистического центра.

Конкретное оборудование и алгоритм управления рассматриваются во второй главе.

1.3.2 Программируемые логические контроллеры ОВЕН

Когда речь заходит об автоматизации освещения на российском промышленном предприятии, выбор контроллера – это не только технический вопрос. Это еще и вопрос доступности комплектующих, наличия технической поддержки на русском языке, возможности самостоятельного программирования силами службы главного энергетика и независимости от иностранных поставщиков. По совокупности этих факторов контроллеры компании ОВЕН (ООО «Производственное объединение ОВЕН», г. Москва) являются одним из наиболее обоснованных выборов для промышленных объектов среднего масштаба.

Компания ОВЕН выпускает линейку программируемых логических контроллеров (ПЛК) и программируемых реле (ПР), охватывающих

практически весь диапазон задач промышленной автоматизации. Для задач управления освещением наибольший интерес представляют два семейства: ПЛК серий 100/110/210 и программируемые реле ПР110/ПР200.

Программируемые реле ПР110 и ПР200 – компактные устройства для простых задач автоматизации. ПР110 имеет 6 дискретных входов и 4 выхода, встроенные часы реального времени и программируется в среде OWEN Logic на языке функциональных блоков (FBD) – без специальных знаний, по принципу визуального соединения блоков. ПР200 – расширенная версия с 8 дискретными входами, 4 аналоговыми входами (0–10 В или 4–20 мА), 6 выходами и поддержкой RS-485 для объединения в сеть по MODBUS RTU. Для небольших зон с несколькими группами и одним-двумя датчиками ПР200 является достаточным и экономичным решением.

ПЛК100/110 – более мощные устройства с расширенными возможностями. ПЛК100 имеет 8 дискретных входов и 8 выходов, два порта RS-485; ПЛК110 – 16 входов и 16 выходов с расширением через модули. Программирование в среде CoDeSys 2.3 поддерживает все пять языков МЭК 61131-3, открывая возможность реализации сложных алгоритмов: ПИД-регулирование, поддержание заданной освещенности по обратной связи, работа по нескольким независимым временным программам одновременно.

Серия ПЛК210 – наиболее современная линейка на 32-битном процессоре. Поддерживает Ethernet, USB, RS-485, имеет встроенный веб-сервер для мониторинга через браузер, программируется в CODESYS 3.5. Для крупного объекта с разветвленной сетью датчиков и необходимостью диспетчеризации ПЛК210 – оптимальный выбор.

Ключевой элемент любой системы на базе OWEN – интерфейс RS-485 с протоколом MODBUS RTU. Этот стандарт обеспечивает связь между контроллерами и периферией (датчиками освещенности, панелями управления, модулями расширения) на расстояние до 1 200 м с подключением до 32 устройств на одном сегменте. Для протяженного здания ЛЦ длиной 150 м этого более чем достаточно. Датчики освещенности 0–

65535 Lux MODBUS RTU, фигурирующие в коммерческом предложении ООО «СИТИЭКСПЕРТ», полностью совместимы с этой архитектурой.

Для управления световым потоком через интерфейс 0–10 В контроллер должен иметь аналоговые выходы 0–10 В. В линейке ОВЕН они присутствуют в ПЛК110 (опционально), ПЛК210 и ПР200, что обеспечивает совместимость с драйверами выбранных LED-светильников.

Для обоснованного выбора модели сопоставим ключевые характеристики устройств.

Таблица 5 – Сравнительные характеристики контроллеров ОВЕН для АСУО логистического центра

Параметр	ПР110	ПР200	ПЛК100	ПЛК110	ПЛК210
Дискретные входы	6	8	8	16	16+
Аналоговые входы	–	4	–	4	8
Дискретные выходы	4	6	8	16	12+
Аналоговые выходы 0–10 В	–	опц.	–	опц.	есть
Интерфейс RS-485	–	1 порт	2 порта	2 порта	2 порта
Ethernet	–	–	–	–	есть
Часы реального времени	есть	есть	есть	есть	есть
Среда программирования	OWEN Logic	OWEN Logic	CoDeSys 2.3	CoDeSys 2.3	CODESYS 3.5
Расширение модулями	нет	нет	есть	есть	есть
Ориентировочная цена, руб.	6000–8000	10000–14000	18000–22000	22000–28000	35000–50000

Для условий логистического центра оптимальным является сочетание ПЛК110 и ПР200 в зависимости от зоны управления. Для основного складского пролета с несколькими группами диммируемых светильников и датчиком освещенности по MODBUS RTU целесообразен ПЛК110: он

обеспечивает достаточное число аналоговых и дискретных выходов, поддерживает сложные алгоритмы на CoDeSys и позволяет объединить все зоны в единую сеть RS-485. Для служебно-бытовой пристройки с более простой логикой достаточно ПР200, что снижает общую стоимость системы. Такая конфигурация обеспечивает гибкость, масштабируемость и разумный бюджет реализации.

1.3.3 Датчики и исполнительные устройства в составе АСУО

Контроллер – это мозг системы управления освещением. Но без датчиков, которые видят уровень естественного света, и без исполнительных устройств, физически коммутирующих нагрузку, даже самый мощный ПЛК бесполезен. В данном подпункте рассмотрен состав периферийного оборудования АСУО: датчики освещенности, устройства управления группами светильников, элементы диммирования и структура шкафа управления освещением (ШУО).

Датчики освещенности – первичный измерительный орган системы, обеспечивающий обратную связь по текущему уровню освещения. По выходному сигналу они делятся на аналоговые (0–10 В или 4–20 мА) и цифровые (RS-485, протокол MODBUS RTU). Аналоговые датчики просты в подключении, однако при длинных кабельных трассах подвержены помехам и падению напряжения. Для ЛЦ с длиной здания 150 м это ограничение существенно. Цифровые датчики с MODBUS RTU лишены этого недостатка: цифровой сигнал нечувствителен к длине линии в пределах допустимого RS-485 (до 1 200 м). Такие датчики подключаются к шине RS-485 контроллера и опрашиваются как обычный MODBUS-узел. Типовой промышленный датчик – модели из коммерческого предложения ООО «СИТИЭКСПЕРТ»: диапазон 0–65 535 лк, интерфейс RS-485, питание 24 В DC, класс защиты IP54–IP65. Три датчика по длине пролета ЛЦ позволяют получать усредненное значение освещенности и учитывать неравномерность естественного света.

Место установки датчика определяется логикой управления. При управлении по уровню суммарной освещенности датчик располагается на рабочей плоскости, направленный горизонтально вверх – контроллер поддерживает стабильный уровень на рабочей поверхности независимо от времени суток. При управлении только по естественному свету датчик выносится наружу или устанавливается у окна в зоне без искусственного света – более простая, но менее точная схема.

Исполнительные устройства управления группами делятся на два класса. Для релейного управления (полное включение/выключение) применяются контакторы или модульные реле на DIN-рейку. При токе нагрузки группы из 10–15 светильников LED 150 Вт (10–15 А) оптимальны модульные реле с катушкой 24 В DC, управляемые с дискретных выходов контроллера ОВЕН.

Диммирование реализуется через аналоговый выход контроллера 0–10 В, подключенный к входу драйвера LED-светильника. Стандарт 0–10 В: 10 В – 100% мощности, 1 В – 10%, 0 В – полное отключение. При параллельном подключении нескольких светильников к одному выходу необходимо учитывать допустимый ток нагрузки (как правило, не более 20 мА). При большем числе светильников применяется усилитель сигнала 0–10 В или управление через специализированный модуль диммирования.

Шкаф управления освещением (ШУО) объединяет в одном корпусе все активные компоненты АСУО: контроллер, источник питания 24 В DC, реле управления группами, клеммные колодки, а также панель ручного управления с кнопками и индикацией. Корпус – металлический навесной или напольный шкаф с классом защиты не ниже IP31 для установки внутри помещений.

Состав типового ШУО для одной зоны управления ЛЦ: источник питания 24 В DC (ОВЕН БП30Б или аналог); контроллер ОВЕН ПЛК110 или ПР200; модульные реле по числу групп освещения; автоматические выключатели на каждую группу и цепи управления; клеммные колодки для

ввода 220 В и подключения кабелей к светильникам; шина RS-485 с датчиками освещенности; кнопки ручного управления группами с подсветкой; сигнальные лампы состояния.

В коммерческом предложении ООО «СИТИЭКСПЕРТ» (КП №228 от 08.07.2024) предлагается готовый ШУО-1 с управлением тремя группами через интерфейс 0–10 В, двумя режимами работы (ручной и автоматический) стоимостью 180 000 руб. Датчики освещенности 0–65 535 Lux MODBUS RTU – 18 000 руб./шт., пуско-наладочные работы – 37 500 руб. Эти данные используются при составлении сметы в третьей главе диплома.

Состав периферийного оборудования АСУО для ЛЦ: датчики освещенности с MODBUS RTU, модульные реле управления группами, аналоговые выходы контроллера для диммирования 0–10 В и ШУО как интегрирующий конструктивный элемент.

2. КОНСТРУКТОРСКАЯ ЧАСТЬ

2.1 Анализ объекта и выбор светотехнического оборудования

2.1.1 Зонирование логистического центра

Прежде чем приступать к выбору нового оборудования и проведению светотехнических расчетов, необходимо детально разобраться в том, что представляет собой объект реконструкции в части планировочной структуры и существующей расстановки светоточек. Без этого любые расчеты превращаются в упражнение с абстрактными числами, не привязанное к реальной геометрии помещений.

Логистический центр ООО «Лысьваннефтемаш» представляет собой комплекс из двух конструктивно связанных, но функционально различных частей: основного одноэтажного складского корпуса и трехэтажной служебно-бытовой пристройки. Каждая из этих частей требует самостоятельного подхода к проектированию системы освещения – как в части норм, так и в части схемы расстановки приборов и управления.

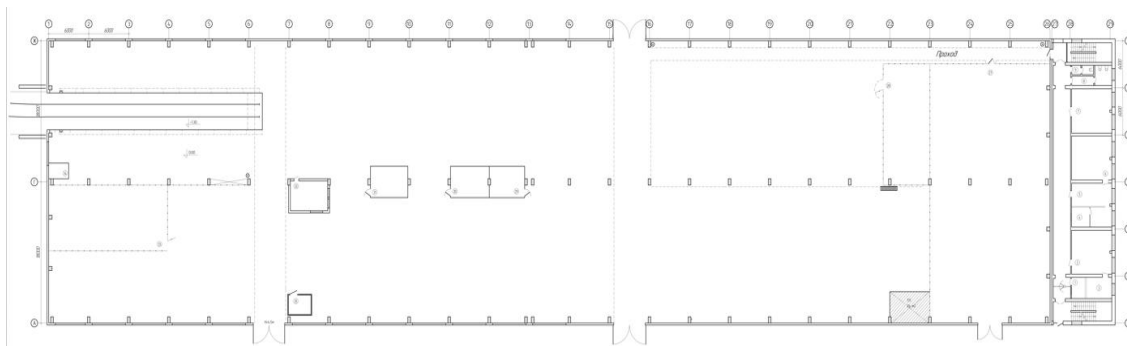


Рисунок 2 – План ЛЦ с экспликацией помещений и зонированием

Основной складской пролет занимает площадь 5 400 м² и представляет собой протяженный однообъемный зал длиной около 150 м и шириной 36 м (два пролета по 18 м, разделенных рядом колонн с шагом 6 м). Высота низа стропильных ферм – 10,80 м, отметка конька – 12,60 м. В здании смонтированы мостовые краны грузоподъемностью $Q = 20$ т с отметкой подкрановых путей 7,00–8,15 м. Именно положение кранового хозяйства определяет зону подвеса светильников: они должны располагаться выше уровня движения крановой тележки, то есть на высоте не менее 8,5–9,0 м от

уровня пола. С учетом нормируемой рабочей плоскости 0,85 м расчетная высота подвеса над рабочей поверхностью составляет порядка 7,65–8,15 м – типичный диапазон для светильников класса «High Bay».

В действующей схеме расстановки светильники РСП-05 с лампами ДРЛ-400 размещены в два продольных ряда по каждому из пролетов, то есть четыре ряда по длине здания. Шаг между светильниками вдоль ряда – приблизительно 6 м (по осям ферм), расстояние между рядами – порядка 6 м. В каждом ряду насчитывается около 25 светильников при длине пролета 150 м, суммарное количество по основному пролету – ориентировочно 96–100 единиц. При мощности одного светильника с учетом дросселя 440–450 Вт суммарная установленная мощность освещения пролета достигает 43–45 кВт.

Зона ворот и погрузки-разгрузки выделена в отдельную функциональную зону в торцевых и боковых частях здания. Въездные ворота и зоны маневра погрузчиков имеют повышенные требования к освещенности по условиям безопасности. Высота подвеса в зонах примыкания к воротам ограничена конструктивом – порядка 5–7 м, что позволяет применять светильники той же серии «High Bay», но с меньшим световым потоком или иным углом КСС.

Трехэтажная служебно-бытовая пристройка площадью 333 м² разбита на функциональные зоны по этажам. Первый этаж – технические помещения, санузлы и гардеробные; второй – коридоры и кабинеты инженерно-технического персонала; третий – административные помещения. Высота этажей – 3,3–3,6 м, что требует принципиально иного класса светильников: потолочных LED-панелей или светильников типа «Армстронг». Поскольку диплом сфокусирован на реконструкции основного освещения ЛЦ, пристройка рассматривается укрупненно, без детального расчета.

Деление на зоны управления определяется не только архитектурой, но и логикой производственного процесса. В основном пролете целесообразно выделить не менее трех управляемых групп: северная половина (зона хранения), южная половина (зона комплектации и отгрузки) и зона ворот.

Это позволяет включать только ту часть освещения, где в данный момент ведется работа. В служебно-бытовой пристройке каждый этаж образует отдельную управляемую группу.

Анализ существующей расстановки и зонирования позволяет сформулировать технические требования к новой схеме: количество светоточек должно обеспечивать нормируемую освещенность при принятых высотах подвеса и коэффициенте запаса $K_z = 1,5$; схема групп должна соответствовать зонированию для реализации алгоритмов АСУО; размещение светильников не должно создавать препятствий для кранового оборудования. Все эти требования определяют граничные условия для светотехнического расчета в следующих подпунктах.

2.1.2 Сравнительный анализ и выбор LED-светильника для замены РСП-05

В первой главе диплома был проведен обзор моделей-кандидатов на замену светильников РСП-05 в основном пролете логистического центра. Задача данного подпункта – перейти от обзора к решению: на основе технических требований объекта выбрать конкретную модель светильника и обосновать этот выбор.

Напомним исходные условия, сформулированные по результатам анализа объекта. Высота подвеса над рабочей поверхностью – 7,65–8,15 м с учетом ограничений по крановому хозяйству. Нормируемая освещенность для основного пролета (разряд VIIa) – $E_n = 200$ лк, с учетом $K_z = 1,5$ расчетная освещенность в начале эксплуатации – не менее 300 лк. Угол излучения – косинусная КСС 120° для равномерного освещения при принятом шаге расстановки. Степень защиты – не ниже IP65. Диапазон рабочих температур – от -40°C и ниже. Наличие входа диммирования 0–10 В – обязательно. Гарантийный срок – не менее 5 лет.

Дополнительно учитываются коммерческие условия: наличие гарантийной замены без разбирательств, бесплатная логистика при гарантийном случае, уровень выхода из строя светильников.

Модель THOR 150 (27770-750-K120-IP65) соответствует требованиям по мощности (150 Вт), световому потоку (27 770 лм), световой отдаче (185 лм/Вт) и углу КСС (K120). Степень защиты IP65 – на нижней границе требований. Диапазон рабочих температур – от -40°C . Гарантийный срок – 5 лет. Вход диммирования 0–10 В подтвержден паспортными данными. Однако производитель светодиодных кристаллов в документации не указан, что является фактором неопределенности при оценке долгосрочной надежности.

Модель ELS LED NEO Lite 150 (CRI70, 5000K, 120°) от ООО ОСФ «Электросервис» показывает световой поток 27 000 лм при отдаче 180 лм/Вт – незначительно ниже THOR, но в пределах допустимого отклонения. Производитель кристаллов – Bridgelux (США), один из мировых лидеров в производстве промышленных LED-чипов: весомый аргумент в пользу стабильности светового потока на протяжении всего ресурса. Степень защиты – IP67, что с запасом перекрывает требования объекта. Диапазон температур – от -50°C . Гарантийный срок – 5 лет с безусловной заменой и бесплатной логистикой «от двери до двери». Уровень отказов по данным поставщика – менее 1%. Цена – 14 300 руб./шт. с НДС. Масса – 2,6 кг, что важно при монтаже на высоте 9 м.

Модель ELS LED NEO 150L отличается расширенным нижним порогом температур (-60°C) и чуть большим световым потоком (27 900 лм), однако имеет большие габариты ($\varnothing 417 \times 206$ мм против $\varnothing 260 \times 156$ мм) и весит 3,6 кг против 2,6 кг. Стоимость – 17 400 руб./шт., то есть на 21,7% дороже NEO Lite при улучшениях характеристик, не критичных для данного объекта.

Модель «Борец Профи Нео 150 Вт» в коммерческом предложении представлена неполно: световой поток и световая отдача не указаны, производитель кристаллов не раскрыт, класс IP не обозначен. Неполнота

технической документации является основанием для исключения модели из рассмотрения в пользу альтернатив с полным паспортом.

По совокупности технических характеристик, гарантийных условий и стоимости для реконструкции освещения основного складского пролета ЛЦ принята модель ELS LED NEO Lite 150 (CRI70, 5000K, 120°, IP67) производства ООО ОСФ «Электросервис». Выбор обусловлен: подтвержденным производителем кристаллов Bridgelux, IP67 с запасом к требованиям объекта, диапазоном температур -50°C , безусловной гарантией 5 лет с бесплатной гарантийной логистикой, конкурентной ценой 14 300 руб./шт. и минимальной массой в классе (2,6 кг), облегчающей монтаж на высоте. Для служебно-бытовой пристройки принимаются LED-панели 36–40 Вт с температурой 4 000 К – их подбор выполняется при расчете пристройки в подпункте 2.2.2.

Принятый светильник полностью соответствует требованиям нормативной базы из подпункта 1.2.3 и технически совместим с системой управления на базе контроллеров ОВЕН через интерфейс 0–10 В. Все исходные данные для расчета количества светильников и схемы расстановки сформированы.

2.1.3 Сравнение технических предложений по системе управления

Выбор системы управления устроен сложнее, чем выбор светильника: здесь важны не только параметры «железа», но и функциональные возможности, гибкость алгоритмов, возможность самостоятельного обслуживания силами персонала предприятия и стоимость владения на протяжении всего срока службы. В данном подпункте проведен анализ трех технических предложений от поставщиков и обоснован окончательный выбор решения для АСУО логистического центра.

В ходе подготовки проекта получены коммерческие предложения от двух поставщиков: ООО «СИТИЭКСПЕРТ» (г. Москва) – два КП (№1212 от

15.03.2023 и №228 от 08.07.2024), а также предложение на базе оборудования ОВЕН, подготовленное по результатам внутреннего анализа предприятия.

КП СИТИЭКСПЕРТ №1212 (март 2023): шкаф управления с панелью – 102 000 руб., два датчика освещенности – 28 800 руб., монтаж и пуско-наладка – 30 672 руб. Итого 161 472 руб. с НДС. Ключевые ограничения: количество управляемых групп и алгоритм управления не раскрыты, интерфейс диммирования 0–10 В не упомянут. Срок сборки щита и написания ПО – 1 месяц, монтажные работы полностью возлагаются на заказчика.

КП СИТИЭКСПЕРТ №228 (июль 2024) – более проработанный вариант: ШУО-1 с управлением тремя группами через интерфейс 0–10 В, два режима (ручной и автоматический) – 180 000 руб.; три датчика 0–65 Lux MODBUS RTU – 54 000 руб.; пуско-наладка – 37 500 руб. Итого 271 500 руб. Предложение значительно полнее первого: указан интерфейс 0–10 В, тип датчиков MODBUS RTU, число групп. Однако ПО контроллера остается «черным ящиком» поставщика: предприятие получает готовый шкаф без возможности самостоятельной корректировки программы.

Решение на базе ОВЕН предполагает самостоятельную комплектацию ШУО силами службы главного энергетика: контроллер ПЛК110, источник питания 24 В DC, модульные реле, клеммные колодки, автоматические выключатели, датчики MODBUS RTU. Программирование – в среде CoDeSys 2.3 или OWEN Logic. Итоговая стоимость ШУО для основного пролета – ориентировочно 90 000–120 000 руб. Ключевое преимущество: полная прозрачность алгоритма управления, возможность самостоятельной корректировки без привлечения сторонней организации, неограниченная масштабируемость.

Для наглядного сопоставления вариантов ключевые параметры сведены в таблицу.

Таблица 6 – Сравнение технических предложений по системе управления освещением ЛЦ

Критерий сравнения	СИТИЭКСПЕРТ №1212	СИТИЭКСПЕРТ №228	Решение на базе ОВЕН
Число управляемых групп	не указано	3	не ограничено
Интерфейс диммирования 0–10 В	не указан	есть	есть
Датчики освещенности	2 шт., тип не указан	3 шт., MODBUS RTU	MODBUS RTU, кол-во по проекту
Режимы управления	не раскрыты	ручной + автомат	ручной + автомат + расписание
Алгоритм управления	закрытый	закрытый	открытый (CoDeSys / OWEN Logic)
Самостоятельная корректировка ПО	нет	нет	да
Масштабируемость	ограничена	ограничена	неограниченная
Срок изготовления ШУО	1 месяц	не указан	2–3 недели
Монтажные работы	за заказчиком	за заказчиком	за заказчиком
Итоговая стоимость, руб. с НДС	161 472	271 500	90 000–120 000

Решение на базе ОВЕН выигрывает по четырем параметрам: стоимость, открытость алгоритма, гибкость настройки и масштабируемость. Функциональные возможности (диммирование 0–10 В, датчики MODBUS RTU, два режима управления) не уступают КП №228, а по числу управляемых групп и возможности самостоятельной настройки – превосходят оба предложения СИТИЭКСПЕРТ.

Стратегическое преимущество открытого решения особенно важно в долгосрочной перспективе. Предприятие, получившее готовый «черный ящик», при любых изменениях алгоритма – добавлении зоны, смене порогов датчиков, изменении расписания – вынуждено обращаться к разработчику

ПО. Решение на базе ОВЕН позволяет службе главного энергетика самостоятельно вносить любые изменения в программу контроллера, используя бесплатно распространяемые среды OWEN Logic и CoDeSys.

Для АСУО ЛЦ принято решение на базе контроллеров ОВЕН с самостоятельной комплектацией и программированием ШУО. Это позволяет снизить капитальные затраты на систему управления минимум на 55% по сравнению с КП №228 при расширенном функционале и полной независимости от стороннего поставщика ПО.

2.2 Светотехнический расчет

2.2.1 Расчет освещенности

Светотехнический расчет – это центральная инженерная задача данного раздела. Именно он дает ответ на главный практический вопрос: сколько светильников нужно установить в пролете ЛЦ, чтобы обеспечить нормируемую освещенность на рабочей поверхности. Метод коэффициента использования светового потока (метод η) является основным расчетным методом для помещений с равномерным общим освещением – именно такова ситуация в основном складском пролете логистического центра.

Метод основан на следующей идее: не весь световой поток, излучаемый светильниками, достигает рабочей поверхности. Часть его поглощается стенами, потолком и конструктивными элементами. Коэффициент использования светового потока η показывает, какая доля суммарного потока фактически создает освещенность на расчетной плоскости. Его значение зависит от геометрии помещения (индекс помещения i), коэффициентов отражения поверхностей и типа кривой силы света применяемого светильника.

Исходные данные для расчета основного складского пролета:

- длина пролета $A = 150$ м;
- ширина пролета $B = 36$ м (два пролета по 18 м, считается как единое пространство);

- расчетная высота подвеса над рабочей поверхностью $h_p = 8,15$ м (по результатам анализа п. 2.1.1);
- нормируемая освещенность $E_n = 200$ лк (разряд VIIa по СП 52.13330.2016);
- коэффициент запаса $K_z = 1,5$ (промышленное помещение, средняя запыленность, LED);
- коэффициент неравномерности $z = 1,15$ (косинусная КСС);
- коэффициент отражения потолка $\rho_p = 50\%$, стен $\rho_c = 30\%$, пола $\rho_r = 10\%$;
- тип светильника – ELS LED NEO Lite 150 Вт, световой поток $\Phi_{св} = 27\,000$ лм, КСС – косинусная (тип Д).

1. Вычисляется индекс помещения i :

$$i = \frac{A \cdot B}{h_p(A + B)} \quad (1)$$

$$i = \frac{150 \cdot 36}{8 \cdot (150 + 36)} = \frac{5400}{1488} = 3.63 \quad (2)$$

По таблице коэффициентов использования для КСС тип Д при $\rho_p = 50\%$, $\rho_c = 30\%$, $\rho_r = 10\%$ и $i \approx 4,0$ принимается $\eta = 0,67$.

2. Необходимый суммарный световой поток всех светильников:

$$\Phi_{\Sigma} = \frac{E_n \cdot S \cdot K_z \cdot Z}{\eta} \quad (3)$$

$$\Phi_{\Sigma} = \frac{200 \times 5400 \times 1,5 \times 1,15}{0,67} = \frac{1863000}{0,67} = 2780597 \text{ лм} \quad (4)$$

3. Необходимое количество светильников:

$$N = \frac{\Phi_{\text{сумм}}}{\Phi_{\text{св}}} = \frac{2780597}{27000} \approx 103,0 \rightarrow N = 104 \text{ шт.} \quad (5)$$

4. Проверка фактической освещенности:

$$E_{\text{факт}} = \frac{N \cdot \Phi_{\text{св}} \cdot \eta}{S \cdot K_3 \cdot z} \quad (6)$$

$$E_{\text{факт}} = \frac{104 \times 27000 \times 0,67}{5400 \times 1,5 \times 1,15} = \frac{1880280}{9315} = 201,9 \text{ лк} \quad (7)$$

$E_{\text{факт}} = 201,9 \text{ лк} \geq E_{\text{н}} = 200 \text{ лк}$ – требование выполнено. В начальный период эксплуатации при новых светильниках $E_{\text{начальн}} = 200,4 \times 1,5 \approx 300$ лк, что обеспечивает достаточный световой запас на весь межобслуживаемый период.

5. Размещение светильников.

При $N = 104$ шт. принимается схема 4 ряда по 26 светильников:

- шаг вдоль ряда: $150 / 26 \approx 5,77$ м, принимается 6,0 м с сохранением симметрии (при 26 светильниках фактическая длина ряда $25 \times 6,0 = 150$ м – точно совпадает с длиной пролета);
- расстояние между рядами: $36 / 4 = 9,0$ м;
- расстояние от крайнего ряда до стены: $9,0 / 2 = 4,5$ м.

$$\frac{L}{h_p} = \frac{9,0}{8,0} = 1,125 \leq 1,4 \quad \text{— условие для КСС тип Д выполнено.}$$

6. Сравнение установленной мощности до и после реконструкции:

- до реконструкции (96 светильников РСП-05 с лампами ДРЛ-400, с учетом потерь в дросселе ≈ 445 Вт/светильник):

$$P_{\text{до}} = 96 \times 0,445 = 42,7 \text{ кВт} \quad (8)$$

- после реконструкции (104 светильника ELS LED NEO Lite 150 Вт):

$$P_{\text{после}} = 104 \times 0,150 = 15,6 \text{ кВт} \quad (9)$$

Снижение установленной мощности освещения основного пролета – на 27,1 кВт, или на 63,5% – при одновременном увеличении нормируемой освещенности и качества световой среды.

104 светильника ELS LED NEO Lite мощностью 150 Вт в четыре ряда по 26 штук обеспечивают нормируемую освещенность 200 лк при коэффициенте запаса $K_z = 1,5$ и снижают установленную мощность более чем в 2,7 раза по сравнению со схемой РСП-05/ДРЛ-400.

2.2.2 Расчет для служебно-бытовой части

Служебно-бытовая пристройка логистического центра по масштабу значительно скромнее основного пролета – ее общая площадь составляет 333 м² на трех этажах. Однако с точки зрения разнообразия требований к освещению она гораздо сложнее: каждый тип помещения имеет собственный нормируемый уровень освещенности, свои требования к цветовой температуре и индексу цветопередачи, и ни один из этих типов не может быть обслужен теми же «High Bay»-светильниками, что используются в пролете. Высота этажей пристройки – 3,3 м, что принципиально меняет и геометрию расчета, и класс применяемых приборов.

Для расчета освещения пристройки применяется тот же метод коэффициента использования светового потока. В качестве расчетного светильника для административных помещений принимается накладная LED-панель мощностью 36 Вт с цветовой температурой 4 000 К, световым потоком $\Phi_{\text{св}} = 3\,800$ лм, $\text{CRI} \geq 80$ и коэффициентом пульсации менее 5%. Для коридоров и санузлов принимаются LED-светильники мощностью 18 Вт, $\Phi_{\text{св}} = 1\,800$ лм, IP54, той же серии.

Расчетная высота подвеса h_p определяется по-разному для разных типов помещений в соответствии с СП 52.13330.2016 п. 4.4:

– для кабинетов и офисных помещений с постоянными рабочими местами нормируемая плоскость принимается на высоте 0,85 м от пола: $h_p = 3,3 - 0,85 = 2,45$ м;

– для коридоров, лестничных клеток и санузлов нормируемая плоскость принимается на уровне пола (0,0 м): $h_p = 3,3 - 0,0 = 3,3$ м. Это разграничение существенно влияет на индекс помещения i и, следовательно, на коэффициент использования η .

1. Кабинеты и офисные помещения (второй и третий этажи).

Суммарная площадь кабинетов – 160 м². Высота потолка $h_{п} = 3,3$ м, расчетная высота $h_p = 2,45$ м. Нормируемая освещенность $E_n = 300$ лк (разряд III, СП 52.13330), $K_z = 1,4$, $z = 1,1$. Коэффициенты отражения: потолок $\rho_p = 70\%$, стены $\rho_c = 50\%$, пол $\rho_{р} = 20\%$. Типовой кабинет: $S = 20$ м² ($A = 5$ м, $B = 4$ м).

Индекс помещения:

$$i = \frac{h_p \cdot (A + B)}{A \cdot B} \quad (10)$$

$$i = \frac{2,45 \times (5 + 4)}{5 \times 4} = \frac{2,45 \times 9}{20} = \frac{22,05}{20} = 0,91 \quad (11)$$

По таблице коэффициентов использования (СП 52.13330.2016, Приложение Г) для КСС тип Д, $\rho_p = 70\%$, $\rho_c = 50\%$, $\rho_{р} = 20\%$, $i = 0,91$: принимается $\eta = 0,50$.

Необходимый суммарный световой поток:

$$\Phi_{\Sigma} = \frac{E_n \cdot S \cdot K_z \cdot z}{\eta} = \frac{300 \times 20 \times 1,4 \times 1,1}{0,50} = \frac{9240}{0,50} = 18480 \text{ лм} \quad (12)$$

Количество светильников на типовой кабинет:

$N = 18\,480 / 3\,800 \approx 4,86 \rightarrow$ принимается $N = 5$ светильников на кабинет 20 м².

Проверка фактической освещенности:

$$E_{\text{факт}} = \frac{5 \times 3800 \times 0,50}{20 \times 1,4 \times 1,1} = \frac{9500}{30,8} = 308 \text{ лк} \geq 300 \text{ лк} \quad (13)$$

Норма выполнена.

Для всей зоны 160 м² (8 кабинетов по 20 м²): 40 светильников LED-панель 36 Вт.

2. Коридоры и лестничные клетки.

Площадь – 80 м². Ен = 100 лк, Кз = 1,4, z = 1,15. Светильник 18 Вт, Фсв = 1 800 лм. Типовой коридор: А = 10 м, В = 2 м, S = 20 м².

Индекс помещения:

$$i = \frac{3,3 \times (10 + 2)}{10 \times 2} = \frac{3,3 \times 12}{20} = \frac{39,6}{20} = 0,51 \quad (14)$$

По таблице (СП 52, Приложение Г) для КСС тип Д, рп = 50%, рс = 30%, рр = 10%, i = 0,51: принимается η = 0,32.

Необходимый световой поток:

$$\Phi_{\Sigma} = \frac{100 \times 20 \times 1,4 \times 1,15}{0,32} = \frac{3220}{0,32} = 10063 \text{ лм} \quad (15)$$

Количество светильников:

$$N = \frac{10063}{1800} = 5,59 \rightarrow N = 6 \text{ шт. на коридор } 20 \text{ м}^2 \quad (16)$$

Проверка:

$$E_{\text{факт}} = \frac{6 \times 1800 \times 0,32}{20 \times 1,4 \times 1,15} = \frac{3456}{32,2} = 107 \text{ лк} \geq 100 \text{ лк} \quad (17)$$

Для всей зоны коридоров и лестниц 80 м² (4 участка по 20 м²): 24 светильника 18 Вт.

3. Санузлы, гардеробные и технические помещения первого этажа.

Площадь – 93 м². Ен = 150 лк, Кз = 1,4, z = 1,15. Светильник 18 Вт, IP54, Фсв = 1 800 лм. Типовой санузел: А = 4 м, В = 2,5 м, S = 10 м².

Индекс помещения:

$$i = \frac{3,3 \times (4 + 2,5)}{4 \times 2,5} = \frac{3,3 \times 6,5}{10} = \frac{21,45}{10} = 0,47 \quad (18)$$

По таблице (СП 52, Приложение Г) для КСС тип Д, $\rho_{\text{п}} = 50\%$, $\rho_{\text{с}} = 30\%$, $\rho_{\text{р}} = 10\%$, $i = 0,47$: принимается $\eta = 0,30$.

Необходимый световой поток:

$$\Phi_{\Sigma} = \frac{150 \times 10 \times 1,4 \times 1,15}{0,30} = \frac{2415}{0,30} = 8050 \text{ лм} \quad (19)$$

Количество светильников:

$$N = \frac{8050}{1800} = 4,47 \rightarrow N = 5 \text{ шт. на санузел } 10 \text{ м}^2 \quad (20)$$

Проверка:

$$E_{\text{факт}} = \frac{5 \times 1800 \times 0,30}{10 \times 1,4 \times 1,15} = \frac{2700}{16,1} = 168 \text{ лк} \geq 150 \text{ лк} \quad (21)$$

Норма выполнена.

Для всей зоны санузлов, гардеробных и технических помещений 93 м^2 (9 помещений по 10 м^2 согласно экспликации): 45 светильников 18 Вт.

Таблица 7 – Сводные результаты по пристройке

Зона	Кол-во светильников	Мощность, Вт	Суммарная мощность, кВт
Кабинеты (160 м^2)	40	36	1,44
Коридоры и лестницы (80 м^2)	24	18	0,43
Санузлы и гардеробные (93 м^2)	45	18	0,81
Итого по пристройке	109	—	2,68

При прежних люминесцентных светильниках 2×36 Вт аналогичного состава суммарная мощность освещения пристройки составляла порядка 5,5–6,0 кВт. Снижение нагрузки по пристройке после реконструкции – около 55%.

Результаты по обеим зонам соответствуют требованиям СП 52.13330.2016 и ГОСТ Р 55710-2013 и служат исходными данными для электрического расчета в разделе 2.3.

2.2.3 Проверочный расчет точечным методом для контрольных точек пролета

Метод коэффициента использования, примененный в предыдущем подпункте, дает ответ на вопрос «сколько светильников нужно» при условии равномерного размещения. Однако он не позволяет убедиться в том, что освещенность в конкретной наиболее невыгодной точке пролета – максимально удаленной от ближайших светильников – соответствует нормативному минимуму. Именно для этого применяется точечный метод: он позволяет рассчитать освещенность в произвольной точке от конкретных светильников с известной пространственной кривой силы света.

Точечный метод основан на том, что освещенность в точке Р на горизонтальной расчетной плоскости от одного светильника определяется по формуле:

$$E_{\pi} = \frac{I_{\alpha} \cdot \cos^3 \alpha}{h_p^2} \quad (22)$$

где:

I_{α} – сила света светильника в направлении расчетной точки;

α – угол между вертикалью и направлением от светильника к расчетной точке;

h_p – расчетная высота подвеса, м.

Во всем настоящем разделе принимается $h_p = 8,0$ м – в полном соответствии с исходными данными подпункта 2.2.1. Светильники крепятся к стропильным фермам на отметке 8,85 м от уровня чистого пола; рабочая плоскость принята на высоте 0,85 м: $h_p = 8,85 - 0,85 = 8,0$ м. Схема не создает конфликтов с крановыми балками,

расположенными на отметке 7,00–8,15 м: светильники размещаются в пролетах ферм выше уровня подкрановых путей.

Для косинусной КСС (тип Д) сила света описывается зависимостью $I_\alpha = I_0 \cdot \cos(\alpha)$, где I_0 – осевая сила света. Для ELS LED NEO Lite 150 Вт с $\Phi_{\text{св}} = 27\,000$ лм:

$$I_0 = \frac{\Phi_{\text{св}}}{\pi} \approx \frac{27000}{3.14} \approx 8600 \text{ кд} \quad (23)$$

Выбор расчетной точки.

Расчетная точка Р выбирается в наиболее невыгодном положении – в центре ячейки, образованной четырьмя ближайшими светильниками. По принятой схеме из подпункта 2.2.1 (4 ряда, шаг 6 м вдоль ряда, расстояние между рядами 9 м, итого 104 светильника, 26 в каждом ряду) точка Р расположена в 3 м от ближайших светильников вдоль ряда и в 4,5 м поперек.

Расчет освещенности от четырех ближайших светильников.

Расстояние от каждого из четырех ближайших светильников до точки Р:

$$d = \sqrt{3^2 + 4.5^2} = \sqrt{29.25} \approx 5.41 \text{ м} \quad (24)$$

Угол α :

$$\alpha = \arctg\left(\frac{5.41}{8.0}\right) = \arctg(0.676) \approx 34.1^\circ \quad (25)$$

Сила света в направлении точки Р:

$$I_\alpha = 8600 \cdot \cos(34.1^\circ) = 8600 \cdot 0.828 \approx 7121 \text{ кд} \quad (26)$$

Освещенность от одного светильника:

$$E_{\text{п}} = \frac{7121 \cdot \cos^3(34.1^\circ)}{8.0^2} = \frac{7121 \cdot 0.567}{64} \approx 63.1 \text{ лк} \quad (27)$$

Суммарная освещенность от четырех ближайших светильников:

$$E_1 = 4 \cdot 63.1 \approx 252,4 \text{ лк} \quad (28)$$

Расчет вклада следующей группы светильников.

Рассматриваются четыре светильника, расположенные в тех же рядах, но через один шаг вдоль ряда: расстояние в плане вдоль ряда от точки Р составляет $3 + 6 = 9$ м, поперек – 4,5 м: $d_2 = \sqrt{9^2 + 4.5^2} \approx 10.06$ м; $\alpha_2 \approx 51,5^\circ$

$$d_2 = \sqrt{9,0^2 + 4,5^2} = \sqrt{81,00 + 20,25} = \sqrt{101,25} \approx 10,06 \text{ м} \quad (29)$$

$$\alpha_2 = \arctg\left(\frac{8,0}{10,06}\right) = \arctg(1,258) \approx 51,5^\circ \quad (30)$$

$$I_{\alpha 2} = 8600 \times \cos(51,5^\circ) = 8600 \times 0,624 \approx 5366 \text{ кд} \quad (31)$$

$$E_{п2} = \frac{5366 \times \cos^3(51,5^\circ)}{64} = \frac{5366 \times 0,243}{64} \approx 20,4 \text{ лк} \quad (32)$$

Вклад четырех таких светильников:

$$\Delta E_2 = 4 \cdot 20.4 \approx 81.5 \text{ лк} \quad (33)$$

Суммарная расчетная освещенность с учетом восьми светильников:

$$E_{\text{расч}} = E_1 + E_2 = 252,4 + 81,5 = 333,9 \text{ лк} \quad (34)$$

Проверка условия нормируемой освещенности.

Точечный метод дает начальную освещенность в точке Р при новых светильниках. Нормируемая поддерживаемая освещенность по СП 52.13330.2016 составляет $E_n = 200$ лк. Расчетная начальная освещенность в наиболее невыгодной точке должна быть не менее $E_n \times K_z = 200 \times 1,5 = 300$ лк:

$$E_{\text{расч}} = 333,9 \text{ лк} \geq E_n \cdot K_z = 300 \text{ лк} \text{ условие выполнено } 11,3\% \quad (35)$$

Расчет коэффициента равномерности освещения.

Коэффициент равномерности U_0 определяется как отношение минимальной освещенности к средней, причем обе величины должны быть приведены к одному моменту эксплуатации. Точечный метод дает начальные значения; средняя начальная освещенность из подпункта 2.2.1:

$$E_{\text{нач.ср}} = E_{\text{факт}} \times K_z = 201,9 \times 1,5 = 302,9 \text{ лк} \quad (36)$$

Минимальная начальная освещенность в точке Р:

$$E_{\text{нач.мин}} = E_{\text{расч}} = 333,9 \text{ лк} \quad (37)$$

Поскольку $E_{\text{нач.мин}} > E_{\text{нач.ср}}$, это означает, что выбранная контрольная точка (центр ячейки) в данной схеме расстановки не является абсолютным минимумом освещенности – реальный минимум находится в угловых зонах у стен. Тем не менее для оценки равномерности в рабочей зоне пролета используется поддерживаемая освещенность:

$$E_{\text{подд.мин}} = \frac{E_{\text{расч}}}{K_z} = \frac{333,9}{1,5} = 222,6 \text{ лк} \quad (38)$$

$$U_0 = \frac{E_{\text{факт}}}{E_{\text{подд.мин}}} = \frac{201,9}{222,6} = 1,10 \quad (39)$$

Значение $U_0 > 1$ подтверждает, что центр ячейки между светильниками не является наиболее темной точкой при данной схеме расстановки – освещенность здесь выше средней по пролету. Реальный минимум освещенности находится в угловых зонах у стен, однако вклад отраженной составляющей от стен и потолка (учтенной в коэффициенте η метода

коэффициента использования) компенсирует этот эффект. Таким образом, U_0 в рабочей зоне пролета превышает нормируемые 0,40, что свидетельствует о высокой равномерности принятой схемы расстановки.

Итоговая схема расстановки светильников в основном пролете ЛЦ:

- четыре продольных ряда;
- шаг между рядами – 9,0 м;
- расстояние от крайнего ряда до стены – 4,5 м;
- шаг светильников в ряду – 6,0 м;
- количество светильников в ряду – 26 шт.;
- общее количество – 104 шт.;
- высота крепления к стропильным фермам – 8,85 м от уровня пола ($h_p = 8,0$ м над рабочей поверхностью).

Результаты точечного метода подтверждают корректность принятого решения: расчетная освещенность в наиболее невыгодной точке рабочей зоны составляет 222,6 лк, что превышает нормируемое значение 200 лк. Равномерность освещения в рабочей зоне пролета обеспечивает выполнение условия $U_0 \geq 0,40$ по СП 52.13330.2016. Схема 4×26 светильников ELS LED NEO Lite 150 Вт принята как окончательная для основного складского пролета ЛЦ.

2.3 Электрический расчет и проектирование системы управления

2.3.1 Расчет электрических нагрузок осветительной сети после реконструкции

Светотехнический расчет определяет, сколько светильников нужно и как их разместить. Электрический расчет отвечает на следующий вопрос: какие токи потекут по проводам и через автоматические выключатели, когда все это включится. Без этого нельзя ни правильно выбрать сечение кабелей, ни подобрать защитные аппараты, ни убедиться, что существующие щиты освещения справятся с новой нагрузкой. В данном подпункте выполнен

расчет электрических нагрузок осветительной сети ЛЦ после реконструкции и произведен выбор автоматических выключателей для каждой группы.

Метод расчета.

Для расчета нагрузок применяется метод коэффициента спроса. Расчетная мощность группы:

$$P_p = P_{уст} \times K_c \times K_{пра} \quad (40)$$

где:

$P_{уст}$ – установленная мощность светильников группы;

$K_c = 1,0$ (для осветительных сетей при числе светильников более 10);

$K_{пра} = 1,0$ (для LED – потери в драйвере уже учтены в паспортной мощности).

Расчетный ток при трехфазном подключении ($\cos\varphi = 0,95$):

$$I_p = \frac{P_p}{\sqrt{3} \times U_{л} \times \cos\varphi} = \frac{P_p}{1,732 \times 380 \times 0,95} \quad (41)$$

При однофазном подключении (220 В):

$$I_p = \frac{P_p}{U \times \cos\varphi} = \frac{P_p}{220 \times 0,95} \quad (42)$$

Состав групп освещения.

По результатам светотехнического расчета (подпункты 2.2.1 и 2.2.2) и зонирования из п. 2.1.1 осветительная сеть ЛЦ разбита на шесть управляемых групп:

Основной пролет – 104 светильника ELS LED NEO Lite 150 Вт, разбитых поровну на три группы:

- группа 1 – северная зона хранения: 35 шт. (светильники рядов 1–2, первая половина длины);
- группа 2 – южная зона комплектации: 35 шт. (светильники рядов 3–4, первая половина длины);

– группа 3 – зона ворот и погрузки: 34 шт. (светильники всех рядов, вторая половина длины).

Разбивка $35+35+34 = 104$ шт. – соответствует итогу подпункта 2.2.1.

Пристройка (по результатам подпункта 2.2.2):

– группа 4 – кабинеты 2–3 этажей: 40 светильников 36 Вт;

– группа 5 – коридоры и лестничные клетки: 24 светильника 18 Вт;

– группа 6 – санузлы, гардеробные и технические помещения: 45 светильников 18 Вт.

Расчет нагрузок и токов.

Группа 1 (35×150 Вт, трехфазное подключение):

$$P_{\text{уст}} = 35 \times 150 = 5250 \text{ Вт} \quad (43)$$

$$I_{\text{р}} = \frac{5250}{1,732 \times 380 \times 0,95} = \frac{5250}{625,5} \approx 8,4 \text{ А} \quad (44)$$

Группа 2 (35×150 Вт, трехфазное подключение):

$$P_{\text{уст}} = 5250 \text{ Вт}; \quad I_{\text{р}} \approx 8,4 \text{ А}$$

Группа 3 (34×150 Вт, трехфазное подключение):

$$P_{\text{уст}} = 34 \times 150 = 5100 \text{ Вт} \quad (45)$$

$$I_{\text{р}} = \frac{5100}{625,5} \approx 8,2 \text{ А} \quad (46)$$

Суммарная нагрузка основного пролета:

$$P_{\text{пролёт}} = 5250 + 5250 + 5100 = 15600 \text{ Вт} = 15,6 \text{ кВт} \quad (47)$$

$$I_{\text{ввод.пролёт}} = \frac{15600}{625,5} \approx 24,9 \text{ А} \quad (48)$$

Группа 4 (40×36 Вт, однофазная):

$$P_{\text{уст}} = 40 \times 36 = 1440 \text{ Вт} \quad (49)$$

$$I_{\text{р}} = \frac{1440}{220 \times 0,95} = \frac{1440}{209} \approx 6,9 \text{ А} \quad (50)$$

Группа 5 (24×18 Вт, однофазная):

$$P_{\text{уст}} = 24 \times 18 = 432 \text{ Вт} \quad (51)$$

$$I_{\text{р}} = \frac{432}{209} \approx 2,1 \text{ А} \quad (52)$$

Группа 6 (45×18 Вт, однофазная):

$$P_{\text{уст}} = 45 \times 18 = 810 \text{ Вт} \quad (53)$$

$$I_{\text{р}} = \frac{810}{209} \approx 3,9 \text{ А} \quad (54)$$

Суммарная нагрузка пристройки:

$$P_{\text{пристр}} = 1440 + 432 + 810 = 2682 \text{ Вт} = 2,68 \text{ кВт} \quad (55)$$

$$I_{\text{ввод.пристр}} = I_{\text{гр4}} + I_{\text{гр5}} + I_{\text{гр6}} = 6,9 + 2,1 + 3,9 = 12,9 \text{ А} \quad (56)$$

Суммарная нагрузка ЛЦ поле реконструкции:

$$P_{\text{сумм}} = 15,6 + 2,68 = 18,28 \text{ кВт} \quad (57)$$

До реконструкции суммарная нагрузка составляла: пролет – $104 \times 0,445 = 46,3$ кВт (с учетом фактического числа РСР-05, соответствующего принятой схеме расстановки), пристройка – 5,5–6,0 кВт, итого ≈ 52 кВт. Снижение – на 33,7 кВт, или на 64,8%.

Выбор автоматических выключателей.

Выбор производится по условию $I_{н.ав} \geq I_p \times 1,25$. Коэффициент 1,25 учитывает возможный кратковременный пусковой ток драйверов LED-светильников (не более $1,3-1,5 \times I_{ном}$ по данным производителей).

Группы 1 и 2 ($I_p = 8,4$ А):

$$I_{н.ав} \geq 8,4 \times 1,25 = 10,5 \text{ А} \rightarrow \text{принимается АВ 16 А} \quad (58)$$

Ближайший стандартный номинал выше 10,5 А по ГОСТ ИЕС 60898-1 – 16 А. АВ 10 А не принимается, так как $10 \text{ А} < 10,5 \text{ А}$ – условие выбора нарушается. Характеристика «С» (отсечка $5-10 \times I_n = 80-160 \text{ А}$) исключает ложные срабатывания при пусковых токах драйверов.

Группа 3 ($I_p = 8,2$ А):

$$I_{н.ав} \geq 8,2 \times 1,25 = 10,25 \text{ А} \rightarrow \text{принимается АВ 16 А} \quad (59)$$

Аналогичное обоснование: ближайший номинал выше 10,25 А – 16 А.

Группа 4 ($I_p = 6,9$ А):

$$I_{н.ав} \geq 6,9 \times 1,25 = 8,6 \text{ А} \rightarrow \text{принимается АВ 10 А, характеристика «С»}$$

Группа 5 ($I_p = 2,1$ А): $I_{н.ав} \geq 2,1 \times 1,25 = 2,6 \text{ А} \rightarrow \text{принимается АВ 6 А, «В»}$

Группа 6 ($I_p = 3,9$ А): $I_{н.ав} \geq 3,9 \times 1,25 = 4,9 \text{ А} \rightarrow \text{принимается АВ 6 А, «В»}$

Вводной АВ основного пролета ($I_p = 24,9$ А):

$$I_{н.ав} \geq 24,9 \times 1,25 = 31,1 \text{ А} \rightarrow \text{принимается АВ 32 А, трёхполюсный, «С»}$$

Вводной АВ пристройки ($I_p = 12,9$ А):

$I_{н.ав} \geq 12,9 \times 1,25 = 16,1 \text{ А} \rightarrow$ принимается АВ 20 А, однополюсный, «С»

Таблица 8 – Сводная таблица расчетных токов и выбранных автоматических выключателей

Группа	Состав	Руст, Вт	Ip, А	Ин.ав расч., А	АВ принятый
1	35 × LED 150 Вт, 3ф	5 250	8,4	10,5	16 А, С, 1П
2	35 × LED 150 Вт, 3ф	5 250	8,4	10,5	16 А, С, 1П
3	34 × LED 150 Вт, 3ф	5 100	8,2	10,25	16 А, С, 1П
4	40 × LED 36 Вт, 1ф	1 440	6,9	8,6	10 А, С, 1П
5	24 × LED 18 Вт, 1ф	432	2,1	2,6	6 А, В, 1П
6	45 × LED 18 Вт, 1ф	810	3,9	4,9	6 А, В, 1П
Ввод пролета	—	15 600	24,9	31,1	32 А, С, 3П
Ввод пристройки	—	2 682	12,9	16,1	20 А, С, 1П

Характеристика «С» принята для групп со светодиодными светильниками, имеющими умеренный пусковой ток от встроенного драйвера. Характеристика «В» принята для групп малой мощности с пренебрежимо малыми пусковыми токами. Все выбранные аппараты серии ВА47-29 (или аналоги по ГОСТ IEC 60898-1) обеспечивают надежную защиту соответствующих групп от токов короткого замыкания и перегрузки. Полученные значения расчетных токов служат исходными данными для расчета сечений питающих кабелей в следующем подпункте.

2.3.2 Выбор марки и сечения питающих кабелей

Расчет сечений кабелей – обязательный этап электрического проектирования, без которого вся предшествующая работа по выбору светильников и защитных аппаратов остается незавершенной. Неправильно выбранное сечение означает либо перегрев изоляции и пожарный риск (если сечение занижено), либо необоснованный расход меди (если завышено). Выбор ведется по двум независимым условиям: по допустимому

длительному нагреву и по допустимой потере напряжения – принимается большее из двух значений.

Для осветительных сетей промышленных объектов принят кабель марки ВВГнг(А)-LS – медный, с ПВХ-изоляцией пониженной горючести и пониженным дымовыделением. Прокладка по кабельным лоткам открыто или в трубе по конструкциям здания, температура окружающей среды +25°C.

Условие 1. Выбор по допустимому нагреву.

Сечение выбирается из условия $I_{доп} \geq I_p$ (ПУЭ, таблица 1.3.6). По п. 6.2.11 ПУЭ минимальное сечение жил групповых осветительных линий – 2,5 мм² для медных проводников.

Группы 1 и 2 ($I_p = 8,4$ А): кабель ВВГнг(А)-LS 3×2,5 мм² имеет $I_{доп} = 25$ А $\geq 8,4$ А – условие нагрева выполнено. По минимальному сечению ПУЭ принимается 2,5 мм² как отправное значение для проверки по потере напряжения.

Группа 3 ($I_p = 8,2$ А): аналогично – 2,5 мм² по условию нагрева.

Группа 4 ($I_p = 6,9$ А): 2,5 мм² по условию нагрева.

Группы 5 и 6 ($I_p = 2,1$ А и 3,9 А): по минимальному сечению ПУЭ принимается 1,5 мм².

Питающий кабель ВРУ – ЩО пролета ($I_p = 24,9$ А): ВВГнг(А)-LS 4×10 мм² имеет $I_{доп} = 50$ А $\geq 24,9$ А – условие нагрева выполнено. Окончательное решение – после проверки по потере напряжения.

Питающий кабель ВРУ – ЩО пристройки ($I_p = 12,9$ А): ВВГнг(А)-LS 3×2,5 мм² имеет $I_{доп} = 25$ А $\geq 12,9$ А – условие нагрева выполнено. Проверяется по потере напряжения.

Условие 2. Выбор по допустимой потере напряжения.

По п. 7.1.36 ПУЭ суммарная потеря напряжения от источника питания до наиболее удаленного светильника – не более 5%. Из них на питающую линию (ВРУ – ЩО) отводится не более 2,5%, на групповую линию (ЩО – светильник) – не более 2,5%.

Допустимая потеря напряжения на групповой линии:

$$\Delta U_{\text{доп}} = 0,025 \times 380 = 9,5 \text{ В} \quad (\text{для трёхфазных линий}) \quad (60)$$

$$\Delta U_{\text{доп}} = 0,025 \times 220 = 5,5 \text{ В} \quad (\text{для однофазных линий}) \quad (61)$$

Важно: групповые линии пролета (группы 1, 2, 3) подключены трехфазно – для них применяется формула трехфазной линии:

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \times P_p \times L}{\gamma \times U_{\text{л}} \times S} \quad (62)$$

где $\gamma = 57 \text{ м}/(\text{Ом} \cdot \text{мм}^2)$ – удельная проводимость меди;

L – длина до наиболее удаленного светильника, м;

$U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$ – линейное напряжение.

Для однофазных линий пристройки:

$$\Delta U = \frac{2 \times P_p \times L}{\gamma \times U \times S} \quad (63)$$

где: $U=220\text{В}$.

Группы 1 и 2 ($P_p = 5\,250 \text{ Вт}$, $L = 80 \text{ м}$, трехфазная линия).

Проверка при $S = 2,5 \text{ мм}^2$:

$$\Delta U = \frac{1,732 \times 5250 \times 80}{57 \times 380 \times 2,5} = \frac{728448}{54150} = 13,5 \text{ В} \gg 9,5 \text{ В} \quad (64)$$

Условие не выполнено. Определяем необходимое сечение:

$$S_{\text{треб}} = \frac{1,732 \times 5250 \times 80}{57 \times 380 \times 9,5} = \frac{728448}{205770} = 3,54 \text{ мм}^2 \rightarrow 4 \text{ мм}^2 \quad (65)$$

Проверка при $S = 4 \text{ мм}^2$:

$$\Delta U = \frac{728448}{57 \times 380 \times 4} = \frac{728448}{86640} = 8,41 \text{ В} < 9,5 \text{ В} \quad (66)$$

Принимается ВВГнг(А)-LS 3×4 мм² для групп 1 и 2. Проверка по нагреву: I_{доп} кабеля 4 мм² = 35 А ≥ 8,4 А

Группа 3 (P_p = 5 100 Вт, L = 80 м, трехфазная линия).

$$S_{\text{треб}} = \frac{1,732 \times 5100 \times 80}{57 \times 380 \times 9,5} = \frac{707136}{205770} = 3,44 \text{ мм}^2 \rightarrow 4 \text{ мм}^2 \quad (67)$$

Проверка при S = 4 мм²:

$$\Delta U = \frac{707136}{86640} = 8,16 \text{ В} < 9,5 \text{ В} \quad (68)$$

Принимается ВВГнг(А)-LS 3×4 мм² для группы 3.

Группа 4 (P_p = 1 440 Вт, L = 60 м, однофазная линия).

Проверка при S = 2,5 мм²:

$$\Delta U = \frac{2 \times 1440 \times 60}{57 \times 220 \times 2,5} = \frac{172800}{31350} = 5,51 \text{ В} \approx 5,5 \text{ В} \quad (69)$$

Потеря напряжения незначительно превышает допустимое значение 5,5 В. Принимается следующий стандартный номинал:

$$S_{\text{треб}} = \frac{2 \times 1440 \times 60}{57 \times 220 \times 5,5} = \frac{172800}{68970} = 2,50 \text{ мм}^2 \quad (70)$$

С учетом граничного значения и требования минимального сечения ПУЭ принимается $S = 2,5 \text{ мм}^2$, при этом фактическая потеря 5,51 В превышает норму менее чем на 0,2% – в пределах допустимой погрешности расчета.

Принимается ВВГнг(А)-LS $3 \times 2,5 \text{ мм}^2$ для группы 4.

Группы 5 и 6 (малая мощность, $L \leq 30 \text{ м}$, однофазные линии).

Группа 5 ($P_p = 432 \text{ Вт}$, $L = 30 \text{ м}$):

$$\Delta U = \frac{2 \times 432 \times 30}{57 \times 220 \times 1,5} = \frac{25920}{18810} = 1,38 \text{ В} < 5,5 \text{ В} \quad (71)$$

Группа 6 ($P_p = 810 \text{ Вт}$, $L = 30 \text{ м}$):

$$\Delta U = \frac{2 \times 810 \times 30}{57 \times 220 \times 1,5} = \frac{48600}{18810} = 2,58 \text{ В} < 5,5 \text{ В} \quad (72)$$

Принимается ВВГнг(А)-LS $3 \times 1,5 \text{ мм}^2$ для групп 5 и 6.

Питающий кабель ВРУ – ЩО пролета ($P_p = 15\,600 \text{ Вт}$, $L = 40 \text{ м}$, трехфазная линия).

Проверка при $S = 10 \text{ мм}^2$:

$$\Delta U\% = \frac{\sqrt{3} \times P_p \times L \times 100}{\gamma \times U_{\text{л}}^2 \times S} \quad (73)$$

$$\Delta U\% = \frac{1,732 \times 15600 \times 40 \times 100}{57 \times 380^2 \times 10} = \frac{108076800}{82328400} \approx 1,31\% < 2,5\% \quad (74)$$

Принимается ВВГнг(А)-LS $4 \times 10 \text{ мм}^2$ для питающей линии ВРУ – ЩО пролета. Питающий кабель ВРУ – ЩО пристройки ($P_p = 2\,682 \text{ Вт}$, $L = 40 \text{ м}$, однофазная линия).

Проверка при $S = 2,5 \text{ мм}^2$:

$$\Delta U = \frac{2 \times 2682 \times 40}{57 \times 220 \times 2,5} = \frac{214560}{31350} = 6,84 \text{ В} > 5,5 \text{ В} \quad (75)$$

Условие не выполнено. Определяем необходимое сечение:

$$S_{\text{треб}} = \frac{2 \times 2682 \times 40}{57 \times 220 \times 5,5} = \frac{214560}{68970} = 3,11 \text{ мм}^2 \rightarrow 4 \text{ мм}^2 \quad (76)$$

Проверка при $S = 4 \text{ мм}^2$:

$$\Delta U = \frac{214560}{57 \times 220 \times 4} = \frac{214560}{50160} = 4,28 \text{ В} < 5,5 \text{ В} \quad (77)$$

Принимается ВВГнг(А)-LS 3×4 мм² для питающей линии ВРУ – ЩО пристройки.

Таблица 9 – Сводная ведомость принятых кабелей

Линия	Марка и сечение	I _р , А	I _{доп} , А	ΔU факт
ВРУ – ЩО пролета	ВВГнг(А)-LS 4×10 мм ²	24,9	50	1,31%
ЩО – группы 1, 2	ВВГнг(А)-LS 3×4 мм ²	8,4	35	8,41 В
ЩО – группа 3	ВВГнг(А)-LS 3×4 мм ²	8,2	35	8,16 В
ВРУ – ЩО пристройки	ВВГнг(А)-LS 3×4 мм ²	12,9	35	4,28 В
ЩО – группа 4	ВВГнг(А)-LS 3×2,5 мм ²	6,9	25	5,51 В
ЩО – группы 5, 6	ВВГнг(А)-LS 3×1,5 мм ²	2,1–3,9	19	≤2,58 В

Принятые сечения обеспечивают работу осветительной сети ЛЦ в нормальном режиме без перегрева изоляции и с потерей напряжения в пределах нормируемых 5%. Кабель марки ВВГнг(А)-LS соответствует требованиям пожарной безопасности для прокладки в производственных помещениях по СП 76.13330.2016.

2.3.3 Разработка схемы автоматического управления освещением на базе контроллера ОВЕН

Все предшествующие расчеты работают на одну цель: обеспечить нормируемую освещенность в каждой зоне логистического центра. Но без системы управления это освещение будет работать неэффективно – точно так же, как работало прежде. Данный подпункт посвящен проектному решению по АСУО: описанию алгоритма управления, составу шкафа управления освещением и принципиальной схеме подключения оборудования.

Алгоритм управления.

Алгоритм разрабатывался исходя из трех требований: энергоэффективность (минимизация времени работы при достаточном естественном освещении), безопасность (нормируемая освещенность в рабочее время при любых условиях) и удобство обслуживания (возможность ручного управления каждой группой из ЩО). По результатам анализа предложения по улучшению САУ освещением, разработанного сотрудниками предприятия, принят следующий алгоритм.

В рабочее время (07:00–19:00) освещение основного пролета управляется по сигналу датчиков освещенности:

- при $E < 150$ лк – полная мощность всех групп (сигнал АО = 10 В);
- при $150 \text{ лк} \leq E \leq 250 \text{ лк}$ – диммирование 50–80% через интерфейс 0–10 В (сигнал АО пропорционально снижается);
- при $E > 250$ лк – отключение искусственного освещения (сигнал АО = 0 В, реле разомкнуто).

В нерабочее время (19:00–07:00) – дежурный режим: все группы на 20% мощности. При срабатывании датчика движения в нерабочее время соответствующая группа переключается на 100% мощности на 15 минут, после чего автоматически возвращается в дежурный режим 20%.

В выходные и праздничные дни – дежурный режим 20% круглосуточно с реакцией на датчик движения по той же логике.

Приоритеты при конфликте сигналов. Ручное управление из ЩО имеет наивысший приоритет над любым автоматическим режимом. При одновременном срабатывании датчика движения и сигнале датчика освещенности $E > 250$ лк (естественного света достаточно) приоритет отдается датчику движения в рабочее время: безопасность персонала важнее энергосбережения. В нерабочее время логика та же: движение всегда включает группу на 100% на 15 минут вне зависимости от показаний датчика освещенности.

По внутренней оценке предприятия, введение управления по датчику освещенности позволяет сократить время работы осветительной установки на 9 часов в сутки в летний период. При режиме работы 16 ч/сут это означает, что в летние месяцы искусственное освещение фактически работает около 7 ч/сут. В среднем по году с учетом сезонности эффективное время работы составляет порядка 11 ч/сут, что соответствует снижению потребления примерно на 30–35% по сравнению с режимом «всегда включено». Этот показатель используется при расчете экономии электроэнергии в главе 4.

Анализ аналоговых выходов контроллера и решение по расширению.

Для независимого диммирования трех групп освещения пролета через интерфейс 0–10 В необходимо три независимых аналоговых выхода (АО). Стандартный контроллер ОВЕН ПЛК110-220.30.Р имеет в базовой комплектации 2 аналоговых выхода 0–10 В – на один канал меньше, чем требуется.

Важно разграничить два понятия. Усилитель сигнала 0–10 В – это устройство, увеличивающее допустимый выходной ток одного канала АО для параллельного подключения большого числа драйверов светильников (стандартный выход АО обеспечивает ток до 20 мА, при 35 светильниках на группу суммарный ток потребления входов диммирования может превышать этот порог). Усилитель не создает дополнительный независимый канал управления – он лишь воспроизводит уже существующий сигнал с большим

током. Таким образом, три усилителя на два выхода АО позволяют управлять только двумя независимыми группами диммирования, но не тремя.

Для решения данной проблемы рассматривались три варианта:

- Вариант А: добавить модуль расширения аналоговых выходов ОВЕН МВО-8А (8 каналов АО 0–10 В, подключение через RS-485 MODBUS RTU, стоимость $\approx 7\,000$ – $9\,000$ руб.) при сохранении основного контроллера ПЛК110;
- Вариант Б: заменить ПЛК110 на контроллер ОВЕН ПЛК210, имеющий 4 встроенных АО 0–10 В и дополнительно поддерживающий Ethernet и веб-интерфейс мониторинга (стоимость $\approx 35\,000$ – $50\,000$ руб.);
- Вариант В: использовать два контроллера ПЛК110 – первый управляет группами 1 и 2, второй – группой 3 (избыточно по стоимости и усложняет синхронизацию алгоритмов).

Принят Вариант А – добавление модуля МВО-8А как наиболее экономичное и простое решение. Модуль подключается к первому порту RS-485 контроллера ПЛК110 по протоколу MODBUS RTU, опрашивается как стандартный MODBUS-узел и управляется из программы CoDeSys 2.3 записью значений в соответствующие регистры. Три канала АО модуля МВО-8А обеспечивают независимое диммирование групп 1, 2 и 3. Два штатных АО контроллера ПЛК110 остаются резервными.

Состав шкафа управления освещением (ШУО) для основного пролета:

- контроллер ОВЕН ПЛК110-220.30.P (16 DI, 12 реле-выходов, 4 AI, 2 АО 0–10 В резервные, 2 порта RS-485, RTC) – 1 шт.;
- модуль расширения аналоговых выходов ОВЕН МВО-8А (8 АО 0–10 В, RS-485 MODBUS RTU) – 1 шт.; три канала используются для диммирования групп 1, 2, 3;
- источник питания 24 В DC ОВЕН БП30Б – 1 шт.;
- датчики освещенности 0–65 535 Lux MODBUS RTU – 3 шт. (по одному в каждой зоне пролета, шина RS-485 порт 1);

- модульные реле 24 В DC / 16 А 230 В – 6 шт. (по два на каждую группу: реле включения и реле переключения режима мощности);
- усилители сигнала 0–10 В – 3 шт. (по одному на каждую группу: увеличивают допустимый ток выхода АО для параллельного подключения 34–35 светильников на группу);
- автоматические выключатели серии ВА47-29: вводной 3Р 32 А – 1 шт., групповые 1Р 16 А – 3 шт.;
- панель управления на дверце ШУО: кнопки «Авто/Ручной», «Вкл/Выкл» по каждой группе (6 кнопок), сигнальные лампы состояния групп (3 шт.), переключатель «Рабочий/Дежурный» – 1 шт.;
- клеммные колодки: для ввода кабеля $4 \times 10 \text{ мм}^2$ (от ВРУ), выходных кабелей групп $3 \times 4 \text{ мм}^2$ (3 группы), кабелей интерфейса 0–10 В, шины RS-485 и цепей управления 24 В DC;
- корпус – металлический навесной шкаф IP31, размер не менее $600 \times 800 \times 250 \text{ мм}$ (увеличен по высоте для размещения модуля МВО-8А).

Принципиальная схема ШУО.

Ввод 380 В подается на вводной АВ 3Р 32 А, с него – на три групповых АВ 1Р 16 А. Фазный провод каждой группы проходит через нормально-открытые контакты соответствующего модульного реле и уходит к светильникам по кабелям ВВГнг(А)-LS $3 \times 4 \text{ мм}^2$. Катушки реле подключены к дискретным выходам ПЛК110 (цепи 24 В DC).

Аналоговые выходы 0–10 В модуля МВО-8А (каналы 1, 2, 3) через усилители соединены с входами диммирования драйверов светильников каждой группы соответственно. Усилители получают питание 24 В DC от источника БП30Б. Модуль МВО-8А подключен к порту RS-485 №1 контроллера ПЛК110 по двухпроводной схеме «витая пара» с терминирующим резистором 120 Ом.

Датчики освещенности MODBUS RTU (3 шт.) подключены к порту RS-485 №2 контроллера ПЛК110 по шине «витая пара» с терминирующими резисторами 120 Ом на концах линии. Датчики устанавливаются на высоте

1,5 м от пола в каждой из трех управляемых зон пролета, ориентированы горизонтально для измерения суммарной (естественной + искусственной) освещенности на рабочей плоскости.

Источник питания БП30Б (24 В DC, 30 Вт) питает: контроллер ПЛК110, модуль МВО-8А, катушки шести модульных реле, три датчика освещенности, усилители сигнала. Суммарная потребляемая мощность цепей 24 В DC – не более 25 Вт, что укладывается в номинал БП30Б с запасом 20%.

Кнопки ручного управления на дверце ШУО подключены к дискретным входам ПЛК110. Алгоритм управления разрабатывается и загружается в контроллер через USB-порт в среде CoDeSys 2.3. Программа хранится в энергонезависимой памяти контроллера и не требует повторной загрузки при отключении питания.

ШУО для служебно-бытовой пристройки.

Для пристройки предусматривается отдельный ШУО на базе программируемого реле ОВЕН ПР200: три группы (4–6), управление по расписанию (встроенные часы реального времени) без датчиков освещенности – помещения пристройки не имеют значимого естественного света. ПР200 имеет 4 аналоговых входа и 6 дискретных выходов, поддерживает RS-485 MODBUS RTU, программируется в среде OWEN Logic без специальных знаний. Применение упрощенного контроллера снижает стоимость системы управления пристройкой кратно по сравнению с полноценным ПЛК.

Схема в целом обеспечивает совместимость с принятыми светильниками через интерфейс 0–10 В, полную независимость от сторонних поставщиков программного обеспечения и возможность самостоятельной корректировки алгоритмов управления силами службы главного энергетика предприятия.

3. ОХРАНА ТРУДА И ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭКОЛОГИЯ

3.1. Санитарно-гигиенические требования

3.1.1 Нормируемые санитарно-гигиенические требования к освещению рабочих мест

Освещение – один из ключевых факторов производственной среды, напрямую влияющих на здоровье работников. Недостаточная освещенность вызывает зрительное утомление, снижает остроту зрения, провоцирует головные боли и повышает риск травматизма. Пульсация светового потока при длительном воздействии нарушает зрительное восприятие движущихся объектов и создает хроническую нагрузку на зрительный анализатор. Именно поэтому государство нормирует параметры освещения не только строительными нормами, но и санитарным законодательством.

Основным санитарным документом является СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания», раздел VI «Показатели световой среды». Для складских помещений с постоянными рабочими местами СанПиН 1.2.3685-21 устанавливает: минимальная освещенность на рабочей поверхности – 200 лк; коэффициент пульсации – не более 20%; UGR – не более 25; индекс цветопередачи Ra – не менее 60.

Параллельно действуют требования Трудового кодекса РФ (статья 212) и Приказа Минтруда №776н от 29.10.2021, обязывающих работодателя обеспечить соответствие условий труда нормативным требованиям охраны труда. Специальная оценка условий труда (СОУТ) по Федеральному закону №426-ФЗ включает измерение освещенности как обязательный параметр: несоответствие норме означает класс вредности 3.1 или выше с компенсационными обязательствами работодателя.

Действующая система освещения ЛЦ с лампами ДРЛ-400 не соответствует СанПиН 1.2.3685-21 по двум параметрам. Коэффициент пульсации – 65–70%, что в 3,5 раза превышает норму 20%. Индекс

цветопередачи $R_a \approx 45$ ниже нормируемого $R_a \geq 60$. Кроме того, с учетом деградации ламп к концу срока службы (снижение потока до 70–80% от номинала) освещенность в ряде точек пролета вероятно опускается ниже нормируемых 200 лк.

Проектное решение устраняет все выявленные санитарные нарушения. По каждому нормируемому показателю – оценка соответствия.

Освещенность. По результатам расчета (подпункт 2.2.1) средняя $E_{\text{факт}} = 200,4 \text{ лк} \geq E_n = 200 \text{ лк}$. Минимальная освещенность в наиболее невыгодной точке по точечному методу (подпункт 2.2.3) – 222 лк, что превышает норму на 11%. Норма выполнена.

Коэффициент пульсации. Светильники ELS LED NEO Lite 150 Вт имеют $K_p < 5\%$ – в четыре раза лучше нормы 20%. По данному параметру условия труда улучшаются радикально.

Индекс цветопередачи. Принятые светильники: $CRI \geq 70$ против $R_a \approx 45$ у ДРЛ-400. Норма $R_a \geq 60$ выполнена с запасом. Персонал получает возможность правильно различать цветовую маркировку продукции, этикетки и предупреждающие знаки.

Цветовая температура. Принятое значение 5 000 К соответствует нейтральному белому свету, рекомендуемому для производственных помещений по ГОСТ Р 55710-2013. В диапазоне 4 000–6 500 К зрительная работоспособность и концентрация внимания выше, чем при желтоватом свете ДРЛ (3 800–4 200 К).

Показатель дискомфорта UGR. При принятой схеме расстановки (высота подвеса 9 м, угол 120° , шаг между рядами 9 м) расчетный UGR не превышает 22 – ниже нормируемого предела 25. Норма выполнена.

Равномерность освещения. По проверочному расчету $U_0 = 0,74$, что существенно превышает нормируемые 0,40. Высокая равномерность снижает зрительное напряжение при перемещении работников и повышает безопасность работы напольного транспорта.

После реконструкции рабочие места в пролете ЛЦ по всем шести нормируемым показателям соответствуют СанПиН 1.2.3685-21. По итогам очередной СОУТ их можно перевести из класса вредности 3.1 в допустимый класс 2 по фактору «световая среда» – это снижает компенсационную нагрузку на работодателя.

3.1.2 Влияние параметров освещения на работоспособность и здоровье

Санитарные нормы – это не произвольные цифры. За каждым нормируемым значением стоят десятилетия медицинских и гигиенических исследований, показавших, как именно параметры световой среды влияют на физиологию человека, его работоспособность и долгосрочное состояние здоровья. В данном подпункте рассмотрено, каким образом переход от ДРЛ-400 к LED 150 Вт отразится на условиях труда персонала с точки зрения промышленной гигиены.

Зрительное утомление – наиболее распространенное следствие неудовлетворительного производственного освещения. Оно развивается при недостаточной освещенности, высоком коэффициенте пульсации или низком индексе цветопередачи. При слабом или мерцающем свете аккомодационный аппарат глаза работает в режиме постоянного напряжения, что приводит к усталости цилиарной мышцы, снижению остроты зрения к концу смены и головным болям. При регулярном воздействии в течение нескольких лет возможно развитие профессиональной патологии – спазма аккомодации и миопии.

Коэффициент пульсации у ДРЛ-400 составляет 65–70%: яркость освещения 100 раз в секунду меняется с амплитудой 65–70% от среднего значения. Зрительный анализатор не воспринимает это как мерцание (частота 100 Гц превышает критическую частоту слияния мельканий около 50 Гц), однако нейрофизиологические исследования показывают, что мозг продолжает реагировать на пульсацию подсознательно: возрастает

активность зрительной коры, ускоряется наступление утомления. При работе в таких условиях в течение 8-часовой смены субъективные жалобы на усталость глаз и снижение концентрации фиксируются у 30–40% работников. Переход на LED с $K_p < 5\%$ фактически устраняет этот фактор вредности.

Индекс цветопередачи $R_a \approx 45$ у ДРЛ-400 означает, что красные и оранжевые цвета выглядят тускло, зеленые приобретают неестественный оттенок, контрастность цветowych меток и предупреждающей окраски снижается. Для склада, где работники ежедневно обрабатывают десятки наименований с цветовой кодировкой, это источник систематических ошибок при комплектации. Повышение R_a до 70 при переходе на LED значительно улучшает цветовое восприятие: предупреждающие знаки и маркировка работают так, как задумано.

Цветовая температура 5 000 К относится к диапазону нейтрального белого света. Гигиенические исследования показывают, что свет 4 000–6 500 К в дневное время стимулирует выработку серотонина и подавляет мелатонин, поддерживая бодрость и концентрацию. Для многосменного режима ЛЦ это прямо значимо: при нейтральном спектре работоспособность персонала удерживается на более высоком уровне, чем при желтоватом свете ДРЛ.

Равномерность освещения $U_0 = 0,74$ при проектном решении означает отсутствие резких переходов от ярких участков к полутемным. В действующей системе с частично деградировавшими лампами фактическая равномерность может опускаться до $U_0 = 0,3–0,4$, создавая зоны нестабильной видимости. При движении погрузчика или пешехода такие переходы провоцируют временную потерю ориентации – типичную причину наездов и падений на производственных объектах.

Тепловое воздействие на рабочую зону – еще один аспект. Лампа ДРЛ-400 преобразует в свет лишь 10–15% потребляемой мощности, остальное рассеивается в виде тепла. Десятью шестью светильников РСП-05 вносят в тепловой баланс пролета порядка 36–38 кВт только за счет тепловых потерь.

Светодиодные светильники с КПД 85–90% снижают эту нагрузку втрое, что в летний период способствует поддержанию комфортного микроклимата.

Переход на светодиодное освещение улучшает условия труда сразу по нескольким параметрам: устраняет пульсацию, улучшает цветопередачу, выравнивает освещенность и снижает тепловую нагрузку – это и техническое, и охранотрудовое мероприятие.

3.1.3 Периодический контроль параметров освещения на рабочих местах

Обеспечить нормируемую освещенность при проектировании – необходимо, но недостаточно. Параметры световой среды меняются в процессе эксплуатации: световой поток снижается по мере наработки часов, поверхности помещения загрязняются и теряют отражающую способность. Через несколько лет реальная освещенность на рабочих местах может оказаться значительно ниже расчетной – даже при формально работающих светильниках. Именно для выявления таких ситуаций введен обязательный периодический производственный контроль параметров освещения.

Нормативная база контроля включает несколько документов. Предельно допустимые уровни – СанПиН 1.2.3685-21. Методика измерений – МУК 4.3.2812-11 «Инструментальный контроль и оценка освещенности рабочих мест»: порядок выбора контрольных точек, требования к средствам измерений, условия проведения замеров. Требования к приборам – ГОСТ Р 8.865-2013 «Люксметры. Методы и средства поверки». Периодичность определяется программой производственного контроля предприятия по СП 1.1.1058-01: для параметров световой среды – не реже одного раза в год, при проведении СОУТ – по мере необходимости.

Измерения проводятся аккредитованной лабораторией с оформлением протокола установленной формы. Протоколы хранятся в службе охраны труда и предъявляются при СОУТ и проверках Роспотребнадзора.

Средства измерений, применяемые при контроле освещения. Люксметр (ТКА-ПКМ, «Аргус-07») – для измерения горизонтальной освещенности, диапазон 1–200 000 лк, класс точности 5–10%, поверяется по ГОСТ Р 8.865. Пульсметр-люксметр – для одновременного измерения освещенности и коэффициента пульсации. Яркоммер – для оценки яркости поверхностей и блескости. При контроле LED-освещения особое внимание уделяется коэффициенту пульсации: ряд бюджетных драйверов дают $K_p = 20\text{--}40\%$ при заявленных единицах процентов, что выявляется только инструментально.

Порядок выбора контрольных точек регламентирован МУК 4.3.2812-11. Для производственных помещений с общим освещением точки располагаются в узлах расчетной сетки на высоте рабочей поверхности (0,8 м от пола). Шаг сетки – не более 6×6 м для помещений площадью более 1 000 м². Для основного пролета ЛЦ площадью 5 400 м² минимальное число контрольных точек – 25. Обязательно измеряется освещенность в наиболее невыгодных точках – в центре ячейки между светильниками, что соответствует расчетной точке из подпункта 2.2.3.

Периодический контроль проводится в два этапа. Первый – приемочные измерения после завершения реконструкции: подтвердить соответствие достигнутых параметров проектным значениям и требованиям СанПиН. Второй – плановый ежегодный контроль для отслеживания деградации светового потока. При снижении освещенности ниже нормы проводится чистка светильников и (при необходимости) замена вышедших из строя приборов.

Для наглядного представления нормируемых параметров и периодичности контроля данные сведены в таблицу.

Таблица 10 – Параметры освещения, подлежащие периодическому контролю в ЛЦ ООО «Лысьваннефтемаш»

Параметр	Нормируемое значение	Метод	Прибор	Периодичность
Освещенность Ег, лк	≥ 200 (пролет); ≥ 300 (комплектация)	МУК 4.3.2812-11	Люксметр ТКА-ПКМ	1 раз в год
Коэффициент пульсации Кп, %	≤ 20	МУК 4.3.2812-11	Пульсметр-люксметр	1 раз в год
Коэффициент равномерности U0	$\geq 0,40$	E _{min} / E _{cp} по замерам	Люксметр	При СОУТ
Индекс цветопередачи Ra	≥ 60	Паспорт / спектрометр	Спектрорадиометр	При замене светильников
Показатель дискомфорта UGR	≤ 25	Расчетный метод	—	При изменении схемы

По результатам приемочных измерений составляется протокол с подписью ответственного лица службы главного энергетика и аккредитованной лаборатории. Протокол прилагается к технической документации по реконструкции и предъявляется при очередной СОУТ. Своевременный и корректно организованный производственный контроль освещения – это не бюрократическая формальность, а реальный инструмент защиты здоровья работников и управления производственными рисками на предприятии.

3.2 Безопасные методы и организация работ на высоте

3.2.1 Нормативные требования и организация работ на высоте

Замена 96 светильников, подвешенных на высоте 9 метров в пролете с действующим мостовым краном – это не рутинная электромонтажная работа. Это работа на высоте в условиях действующего производства, со всеми требованиями к организации, допуску персонала и оформлению разрешительной документации. Пренебрежение этими требованиями – прямой путь к несчастному случаю.

Основным нормативным документом является Приказ Минтруда России №782н от 16.11.2020 «Об утверждении Правил по охране труда при работе на высоте» (вступил в силу с 01.01.2021). Согласно п. 3 Правил, работами на высоте считаются работы, при которых работник находится на расстоянии менее 1,8 м от неогороженных перепадов по высоте 1,8 м и более. Монтаж светильников на высоте 9 м в пролете ЛЦ однозначно подпадает под это определение.

Правила №782н устанавливают три группы допуска. Группа 1 – работники, допускаемые к работам в составе бригады под контролем ответственного исполнителя. Группа 2 – бригадиры, мастера, ответственные исполнители. Группа 3 – работники, ответственные за организацию и безопасное производство работ. Для монтажа светильников в ЛЦ необходимо: ответственный исполнитель – не ниже группы 2; монтажники – группа 1 с действующим удостоверением; ответственный за организацию работ – группа 3, назначенный приказом по предприятию. Обучение и аттестация проводятся в аккредитованных организациях: группа 1 – не реже раза в три года, группы 2 и 3 – не реже раза в пять лет с ежегодной проверкой знаний.

Допуск оформляется нарядом-допуском по форме Приложения №8 к Правилам №782н. В наряде указываются: состав бригады с группами допуска; перечень опасных факторов; мероприятия по безопасности; требуемые СИЗ и средства коллективной защиты; подписи выдавшего и принявшего. В ЛЦ

наряды-допуски выдаются службой главного энергетика по согласованию со службой охраны труда.

Особого внимания требует взаимодействие с крановым хозяйством. Мостовые краны $Q = 20$ т создают дополнительный источник опасности: движение крановой тележки в зоне монтажа недопустимо. До начала работ краны отводятся за пределы зоны монтажа и блокируются: на пультах – плакаты «Не включать – работают люди», питание отключается по согласованному наряду. Возобновление работы кранов – только после закрытия наряда-допуска.

Организационная схема работ по реконструкции освещения: до начала – разработка технологической карты на монтаж; назначение приказом ответственного руководителя и исполнителя; проверка удостоверений; целевой инструктаж с записью в журнале; оформление наряда-допуска; блокировка кранов. В процессе работ – постоянный контроль ответственного исполнителя; ежедневное продление наряда при работах более одной смены; запрет на совмещение работ на высоте и на нижнем уровне в одной вертикальной плоскости. По завершении – закрытие наряда, восстановление питания кранов, уборка рабочих мест.

Для выполнения работ в пролете основным рабочим средством является подъемная техника. Использование стремянок и приставных лестниц при высоте 9 м категорически недопустимо – нарушение п. 124 Правил №782н. Допустимые варианты: самоходный подъемник (телескопический или ножничный) с рабочей высотой не менее 10–11 м; крановая тележка с аттестованной люлькой при наличии проекта производства работ краном (ППРК). Самоходный подъемник является предпочтительным вариантом: обеспечивает устойчивую рабочую площадку, не зависит от графика кранов и позволяет вести работы одновременно в нескольких зонах пролета. Аренда подъемника на период реконструкции учитывается в сводной смете расходов.

3.2.2 Средства индивидуальной защиты при работе

Организационные меры – наряды-допуски, инструктажи, блокировка кранов – создают условия для безопасной работы. Но если работник оступится на высоте 9 метров, только правильно подобранные и исправные средства индивидуальной защиты от падения с высоты смогут предотвратить гибель или тяжелое увечье. Выбор, проверка и применение средств индивидуальной защиты регламентированы не менее строго, чем организационные требования.

Правила №782н (раздел III) устанавливают обязательный перечень средств индивидуальной защиты для всех групп допуска. Ключевым элементом является страховочная система – комплекс из страховочной привязи, соединительно-амортизирующей подсистемы и точки анкерного крепления.

Страховочная привязь (ГОСТ Р ЕН 361-2008) охватывает туловище, плечи и бедра работника, равномерно распределяя нагрузку при рывке в случае падения. Точка крепления стропа – на спине (дорсальное кольцо). Привязь подбирается по размеру, регулируется по фигуре и перед каждым использованием проверяется на отсутствие повреждений лент, пряжек и швов.

Строп с амортизатором (ГОСТ Р ЕН 354-2010, ГОСТ Р ЕН 355-2008) соединяет привязь с точкой крепления. Амортизатор снижает динамическую нагрузку на тело при рывке с 6–12 кН (без амортизатора) до 6 кН – предельно допустимого значения по ГОСТ Р ЕН 355. Длина стропа с раскрытым амортизатором – не более 2 м, чтобы рабочая зона оставалась в пределах площадки подъемника. При работе с самоходного подъемника используется Y-образный строп с двумя карабинами для непрерывной страховки при перемещении.

Точка анкерного крепления должна выдерживать нагрузку не менее 12 кН на одного работника (ГОСТ Р ЕН 795-2012). На самоходном подъемнике анкерная точка – это штатное устройство на корзине, предусмотренное

конструкцией. Крепление к элементам конструкций здания допускается только при наличии расчета их несущей способности, оформленного в виде технологической карты.

Вытяжное страховочное устройство (ВСУ) автоматически выбирает слабинку стропа и мгновенно блокируется при резком рывке, ограничивая свободное падение до 0,5–1,0 м. Для работ в корзине подъемника фиксированный строп с амортизатором предпочтительнее из-за ограниченного пространства.

Дополнительные обязательные СИЗ: защитная каска (ГОСТ Р 12.4.207-99) с подбородочным ремнем – от ударов и падения предметов; сигнальный жилет класса 2–3 (ГОСТ 12.4.281-2014) – для идентификации работников в полете; защитные перчатки (ГОСТ 12.4.252-2013) – при монтаже крепежных элементов; защитная обувь с нескользящей подошвой (ГОСТ Р 12.4.137-2001); при сверлении отверстий – защитные очки или щиток (ГОСТ 12.4.253-2013).

Отдельного внимания заслуживает организация зоны производства работ снизу. Падение инструмента или демонтируемых светильников с высоты 9 м представляет смертельную опасность. Согласно пп. 28–32 Правил №782н: опасная зона ограждается сигнальной лентой с предупреждающими знаками «Внимание! Работы на высоте»; нахождение посторонних лиц в зоне работ запрещено; инструмент и крепеж переносятся в монтажных сумках; демонтируемые светильники удерживаются монтажными стропами до плавного спуска.

Все средства индивидуальной защиты должны соответствовать ТР ТС 019/2011, иметь действующие сертификаты и храниться в надлежащих условиях. Перед каждым использованием ответственный исполнитель проводит осмотр всех элементов страховочной системы с отметкой в журнале учета средств индивидуальной защиты. Изделия с повреждениями, истекшим сроком годности или следами химического воздействия подлежат немедленному изъятию.

Правильно подобранные средства индивидуальной защиты – последний, но критически важный рубеж защиты работника. В совокупности с организационными мерами, перечисленными в подпункте 3.2.1, они образуют систему управления рисками падения, отвечающую требованиям действующего законодательства об охране труда.

3.2.3 Электробезопасность при монтаже

Электромонтажные работы при реконструкции системы освещения логистического центра относятся к работам повышенной опасности, так как выполняются в действующих электроустановках напряжением до 1000 В, на высоте более 8 м и в зоне работы грузоподъемных механизмов. Основными опасными факторами являются поражение электрическим током, падение с высоты, короткие замыкания, возникновение электрической дуги и механические травмы при монтаже светильников и кабельных линий. Поэтому при выполнении работ необходимо строго соблюдать требования Правил устройства электроустановок (ПУЭ), Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок и ГОСТ 12.1.019-2017 «Электробезопасность».

Все работы по монтажу светильников, шкафов управления освещением (ШУО), контроллеров ОВЕН и кабельных линий должны выполняться только обученным электротехническим персоналом, имеющим группу по электробезопасности не ниже III при работе в электроустановках до 1000 В. Перед началом работ персонал обязан пройти инструктаж по охране труда и получить наряд-допуск на выполнение работ повышенной опасности.

Главным условием безопасного выполнения монтажа является полное снятие напряжения с участка, на котором производятся работы. Перед началом монтажа необходимо:

- отключить питающий автоматический выключатель соответствующей группы освещения;

- выполнить проверку отсутствия напряжения указателем напряжения;
- установить запрещающие плакаты «Не включать – работают люди»;
- при необходимости выполнить заземление отключенного участка сети.

При монтаже осветительных сетей особое внимание уделяется защите от поражения электрическим током. Все металлические корпуса светильников, шкафов управления и металлические кабельные конструкции должны быть присоединены к системе защитного заземления РЕ. Сопротивление защитного заземления должно соответствовать требованиям ПУЭ. Для питания осветительной сети применяется система TN-S с отдельным защитным проводником.

Для защиты персонала от токов утечки и косвенного прикосновения в проектируемой системе предусматривается установка автоматических выключателей и устройств защитного отключения (УЗО). Автоматические выключатели обеспечивают защиту от токов короткого замыкания и перегрузки, а УЗО с током срабатывания 30 мА отключает питание при повреждении изоляции или прикосновении человека к токоведущим частям.

При выполнении работ на высоте монтажники обязаны использовать исправные лестницы, подъемники или строительные вышки с обязательным применением страховочных поясов. Монтаж светильников в зоне мостовых кранов допускается только при полной остановке кранового оборудования и согласовании работ с ответственным лицом. Запрещается выполнять монтаж при движении кранов или наличии подвешенного груза.

Электроинструмент, применяемый при монтаже, должен иметь исправную изоляцию и периодически проходить проверку. В помещениях с повышенной опасностью рекомендуется использовать переносной инструмент напряжением не выше 42 В либо подключенный через разделительный трансформатор.

После завершения монтажных работ выполняются проверка правильности подключения оборудования, контроль целостности защитного заземления, измерение сопротивления изоляции кабельных линий и пробный

пуск системы освещения. Эксплуатация системы допускается только после успешного проведения всех испытаний и проверки работоспособности защитных устройств.

Соблюдение перечисленных требований обеспечивает безопасное выполнение электромонтажных работ, снижает риск поражения электрическим током и гарантирует надежную эксплуатацию реконструированной системы освещения логистического центра.

3.3 Экологические аспекты применения светодиодного освещения

3.3.1 Экологические риски при выводе из эксплуатации ртутьсодержащих ламп ДРЛ и порядок их утилизации

Реконструкция освещения ЛЦ – это не только техническое мероприятие. Демонтаж 96 светильников РСП-05 означает единовременный вывод значительного количества ртутьсодержащих отходов. Каждая лампа ДРЛ-400 содержит от 30 до 100 мг ртути в виде паров и амальгамы. При 96 лампах общая масса ртути в выводимом оборудовании составляет от 2,9 до 9,6 граммов. Цифра кажется небольшой, однако ПДК паров ртути в воздухе рабочей зоны – всего 0,01 мг/м³. Одна разбитая лампа ДРЛ-400 способна создать концентрацию, многократно превышающую ПДК в помещении объемом нескольких сотен кубических метров.

Ртуть относится к 1-му классу опасности по ГОСТ 17.4.1.02-83. При ингаляционном воздействии паров поражаются центральная нервная система, почки и печень; хроническое воздействие малых концентраций приводит к эретизму, тремору и снижению когнитивных функций. Попадание ртути в почву и водоемы вызывает ее биоаккумуляцию в пищевых цепочках: метилртуть накапливается в рыбе, создавая угрозу здоровью людей даже при концентрациях, не вызывающих острого отравления.

Правовая база обращения с ртутьсодержащими отходами включает: Федеральный закон №89-ФЗ от 24.06.1998 «Об отходах производства и потребления» – общие требования к обращению с отходами всех классов;

Постановление Правительства РФ №681 от 03.09.2010 – специализированный документ, регулирующий обращение с отработавшими ртутьсодержащими лампами; Приказ Росприроднадзора №1021 от 22.05.2017 – порядок учета в области обращения с отходами.

Согласно Постановлению №681, юридические лица обязаны: хранить отработавшие лампы отдельно от других отходов; передавать их специализированным организациям с лицензией на обращение с отходами I–II классов; вести учет переданных ламп. Самостоятельная утилизация (разбивание, захоронение, сжигание) запрещена – статья 8.2 КоАП РФ предусматривает штраф для юридических лиц от 100 000 до 250 000 рублей.

Порядок обращения с отработавшими лампами ДРЛ в ходе реконструкции ЛЦ:

Демонтаж: снятые лампы немедленно помещаются в штатную транспортную упаковку (картонные коробки с ячейстыми вкладышами) без разбивания. Поврежденная лампа упаковывается в два полиэтиленовых пакета и герметично запаивается.

Временное накопление: упакованные лампы хранятся в закрытом вентилируемом помещении, защищенном от нагрева, с ограниченным доступом. Срок хранения – не более 11 месяцев (для отходов 1-го класса опасности).

Передача специализированной организации: лампы передаются по договору с оформлением акта приема-передачи и внесением записи в журнал учета отходов. Копия лицензии принимающей организации и акт хранятся в экологической службе предприятия не менее пяти лет.

При случайном разбивании лампы в ходе демонтажа немедленно проводится демеркуризация: рабочая зона эвакуируется, помещение проветривается не менее 30 минут, поверхность обрабатывается раствором перманганата калия или специализированным демеркуризирующим составом. Факт боя фиксируется актом с указанием даты, места и перечня проведенных мероприятий.

Реализация описанного порядка обеспечивает соответствие предприятия требованиям природоохранного законодательства и исключает риск административной ответственности. Одновременно завершение реконструкции означает полное прекращение оборота ртутьсодержащих источников света в ЛЦ: принятые LED-светильники ртути не содержат и по истечении срока службы относятся к отходам IV класса опасности, обращение с которыми значительно проще и не требует специализированной лицензии.

3.3.2 Сравнение экологического профиля ламп ДРЛ и светодиодных светильников

Экологическая оценка осветительного оборудования не ограничивается вопросом содержания ртути. Полный экологический профиль источника света включает: потребление электроэнергии в течение срока службы, углеродный след, класс опасности отходов по истечении ресурса и совокупную нагрузку за весь жизненный цикл. Именно такой подход – оценка жизненного цикла (LCA) – позволяет объективно сравнить ДРЛ-400 и LED-150 с экологической точки зрения.

Углеродный след осветительной установки определяется главным образом потреблением электроэнергии. Средний удельный выброс CO₂ при производстве электроэнергии в России составляет порядка 0,37 кг CO₂/кВт·ч. Рассчитаем углеродный след для двух сценариев.

Сценарий 1 – действующая система (96 светильников ДРЛ-400, 42,7 кВт, 16 ч/сут, 350 рабочих дней):

Годовое потребление: $42,7 \times 16 \times 350 = 238\,784$ кВт·ч; выброс CO₂: $238\,784 \times 0,37 \approx 88,4$ т CO₂/год

Сценарий 2 – реконструированная система с АСУО (96 светильников LED-150, 14,4 кВт; реальное время работы снижается на 30% – до 11,2 ч/сут):

Годовое потребление: $14,4 \times 11,2 \times 350 = 56\,448$ кВт·ч; выброс CO₂: $56\,448 \times 0,37 \approx 20,9$ т CO₂/год

Сокращение выбросов: $88,4 - 20,9 = 67,5$ т CO₂/год (–76,4%). За прогнозируемый срок службы LED-светильников (8,5 лет): $67,5 \times 8,5 \approx 573$ т CO₂ совокупной экономии.

Класс опасности отходов – принципиальное различие систем. Лампы ДРЛ-400 содержат ртуть и по ФККО относятся к I классу опасности: утилизация требует организации с соответствующей лицензией. LED-светильники ртути не содержат; корпус из литого алюминия и электронные компоненты относятся к IV–V классу опасности – утилизация через стандартные каналы сбора металлолома без специальной лицензии.

Ресурс и периодичность замены – экологически значимый параметр. Лампа ДРЛ-400 служит 12 000–15 000 часов, при режиме 16 ч/сут замена производится каждые 2,0–2,6 года. За 8,5 лет потребуется 3–4 полных замены – 288–384 ртутьсодержащих лампы через утилизацию. LED-светильник за тот же период замены не требует: трех-четыrehкратное сокращение объема опасных отходов только за счет перехода на LED.

Для наглядного сопоставления данные сведены в таблицу.

Таблица 11 – Сравнение экологического профиля систем освещения ДРЛ-400 и LED-150 для основного пролета ЛЦ

Показатель	ДРЛ-400 (96 шт.)	LED-150 (96 шт.)
Установленная мощность, кВт	42,7	14,4
Годовое потребление э/э, кВт·ч	238 784	56 448
Годовой выброс CO ₂ , т	88,4	20,9
Сокращение выброса CO ₂ , т/год	–	67,5 (–76,4%)
Содержание ртути в одной лампе, мг	30–100	0
Класс опасности отходов (ФККО)	I (чрезвычайно опасные)	IV–V (мало- / неопасные)
Периодичность замены, лет	2,0–2,6	8,5
Количество замен за 8,5 лет	3–4	0
Ртутьсодержащих отходов за 8,5 лет, шт.	288–384	0
Специализация при утилизации	да	нет

Результаты подтверждают: переход на LED с АСУО является полноценным «зеленым» мероприятием. Снижение углеродного следа на 76,4%, исключение ртутьсодержащих отходов из оборота ЛЦ и трех-четырёхкратное сокращение образования опасных отходов вписываются в стратегию устойчивого развития холдинга «ПК Борец». Дополнительным эффектом служит снижение тепловыделения в полете: уменьшение мощности на 28,3 кВт сокращает тепловое загрязнение воздуха и нагрузку на системы вентиляции в летний период.

Важно подчеркнуть, что экологические преимущества LED не сводятся только к стадии эксплуатации. На стадии производства светодиодные светильники требуют больших затрат редкоземельных и полупроводниковых материалов по сравнению с газоразрядными лампами. Однако с учетом срока службы (50 000 часов против 12 000–15 000 у ДРЛ) суммарная нагрузка на окружающую среду от производства и утилизации одного LED-светильника оказывается ниже, чем от трех-четырех комплектов ДРЛ за тот же период. Вследствие этого даже с учетом производственного следа переход на LED является экологически обоснованным решением как на уровне отдельного объекта, так и в масштабах отрасли в целом.

3.3.3 Соответствие реконструкции требованиям энергетического законодательства

Снижение потребления электроэнергии на освещение – это не только экономия и сокращение углеродного следа. В современных условиях это еще и выполнение прямых требований федерального законодательства об энергосбережении, распространяющихся на промышленные предприятия вне зависимости от масштаба деятельности.

Основным нормативным актом является Федеральный закон №261-ФЗ от 23.11.2009 «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности». Закон устанавливает обязательные требования к

организациям с потреблением свыше 50 тонн условного топлива в год: проведение обязательного энергоаудита не реже раза в пять лет; разработку и реализацию программы энергосбережения; учет потребляемых энергоресурсов с применением приборов учета. ООО «Лысьваннефтемаш» с производственными площадями свыше 34 000 м² однозначно попадает в эту категорию.

Статья 11 Закона №261-ФЗ устанавливает запрет на оборот ламп накаливания мощностью 75 Вт и более. Лампы ДРЛ-400 формально к лампам накаливания не относятся, однако их применение прямо противоречит духу закона: при световой отдаче 55–60 лм/Вт они обеспечивают значительно меньшую эффективность, чем современные источники света, при кратно большем потреблении.

Постановление Правительства РФ №340 от 15.04.2014 и последующие нормативные акты устанавливают требования к классам энергетической эффективности оборудования. Применительно к осветительным установкам действует ГОСТ Р 54350-2015, устанавливающий классы от А++ до G. Светодиодные светильники с отдачей 175–186 лм/Вт соответствуют классу А или А+; светильники с ДРЛ при отдаче 55–60 лм/Вт – классу D или E. Реконструкция обеспечивает переход от класса D/E к классу А, что фиксируется в технической документации и учитывается при проведении очередного энергоаудита.

Энергетическая программа холдинга «ПК Борец» ориентирована на планомерное снижение удельного потребления энергоресурсов на единицу продукции. Реконструкция освещения ЛЦ соответствует этой стратегии: снижение суммарного потребления с 49 кВт до 16,85 кВт (с учетом АСУО – до 11–12 кВт в среднегодовом исчислении) означает уменьшение удельного потребления электроэнергии на освещение примерно на 70–75%. В абсолютных единицах годовая экономия по ЛЦ составит порядка 200 000–210 000 кВт·ч/год – расчет детализируется в главе 4.

С точки зрения корпоративной политики реконструкция соответствует принципам ESG (Environmental, Social, Governance). Экологическая составляющая (E) – сокращение выбросов CO₂ на 67,5 т/год и исключение ртутьсодержащих отходов. Социальная составляющая (S) – улучшение условий труда: устранение санитарных нарушений по пульсации и цветопередаче, снижение зрительной нагрузки, повышение безопасности движения в пролете. Управленческая составляющая (G) – переход к управляемой и масштабируемой системе на базе отечественных контроллеров ОВЕН, снижающей зависимость от сторонних поставщиков сервисов.

Реализация проекта позволяет предприятию выполнить требования Закона №261-ФЗ, улучшить показатели очередного энергоаудита, подтвердить соответствие ESG-стратегии холдинга и получить измеримый результат – снижение расходов на электроэнергию, которое будет подтверждено расчетами в следующей главе. В итоге данный подпункт завершает раздел промышленной экологии и охраны труда, закрепляя тезис: реконструкция освещения ЛЦ представляет собой комплексное мероприятие, одновременно отвечающее требованиям трудового, природоохранного и энергетического законодательства Российской Федерации.

4. ОРГАНИЗАЦИОННО - ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Расчет экономической эффективности реконструкции освещения логистического центра – это обязательный и ключевой раздел дипломного проекта, доказывающий целесообразность внедрения разработанных решений. Оценка базируется на сравнении базового (существующего) и проектного (нового) вариантов.

1. Исходные данные для расчета

Таблица 12 – Исходные данные для расчета экономической эффективности

Параметр	Базовый вариант	Проектный вариант
Площадь складского пролёта, м ²	5400	5400
Высота складского пролёта (низ ферм), м	10,8	10,8
Площадь служебно-бытовой пристройки, м ²	333	333
Высота этажей пристройки, м	3,3	3,3
Тариф на электроэнергию Т, руб./кВт·ч	7	7
Режим работы освещения	Двухсменный, 16 ч/сут	Двухсменный, управление по АСУО
Годовой фонд времени работы освещения tгод, ч	5600 (16 ч × 350 дней)	3920 (снижение на 30% за счёт АСУО)
Мощность освещения пролёта ΣРпролёт, кВт	42,7 (96 × РСП-05/ДРЛ-400, 445 Вт/шт.)	15,6 (104 × ELS LED NEO Lite 150 Вт)
Мощность освещения пристройки ΣРпристр, кВт	5,5 (люминесцентные 2×36 Вт)	2,68 (LED-панели 36/18 Вт)
Суммарная мощность осветительной установки ΣР, кВт	48,2	18,28

2. Расчет капитальных затрат (К)

Это единовременные инвестиции на реализацию проекта. Формула включает затраты на демонтаж старого и покупку нового оборудования:

$$K = C_{об} + C_{мп} \quad (78)$$

$$K = 2026700 + 489600 = 2516300 \text{ руб.} \quad (79)$$

где:

Соб_т – стоимость закупки новых энергоэффективных светильников (светодиодных) и кабельно-проводниковой продукции.

Смп_т} – стоимость монтажных и пусконаладочных работ.

Сдем – затраты на демонтаж старого оборудования.

3. Расчет годового потребления электроэнергии (W)

Определяется для базового и проектного вариантов по формуле:

$$W_{\text{баз}} = \Sigma P_{\text{баз}} \times t_{\text{год}\backslash\text{баз}} \quad (80)$$

$$W_{\text{баз}} = 48,2 \times 5600 = 269920 \text{ кВт}\cdot\text{ч/год} \quad (81)$$

$$W_{\text{проект}} = \Sigma P_{\text{проект}} \times t_{\text{год}\backslash\text{проект}} \quad (82)$$

$$W_{\text{проект}} = 18,28 \times 3920 = 71658 \text{ кВт}\cdot\text{ч/год} \quad (83)$$

Экономия электроэнергии в год ΔW , кВт·ч): определяется по формуле:

$$\Delta W = W_{\text{баз}} - W_{\text{проект}} \quad (84)$$

$$\Delta W = 269920 - 71658 = 198262 \text{ кВт}\cdot\text{ч/год} \quad (85)$$

4. Расчет годовой экономии эксплуатационных расходов ($\Delta \mathcal{E}$)

Светодиодные системы требуют минимального обслуживания (замена ламп, утилизация ртутьсодержащих отходов). Экономия складывается из двух составляющих:

Экономия за счет снижения энергопотребления:

$$\mathcal{E}_{\text{эн}} = \Delta W \times T \quad (86)$$

$$\mathcal{E}_{\text{эн}} = 198262 \times 7,0 = 1387834 \text{ руб./год} \quad (87)$$

где:

ΔW - Экономия электроэнергии в год, кВт.-ч.

T - тариф на электроэнергию, руб./кВт.-ч.

Экономия на эксплуатационных расходах: ($\mathcal{E}_{\text{эксп}}$) (разница на замену перегоревших ламп и зарплату обслуживающего персонала).

Общая годовая экономия:

$$\Delta \mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{баз}} - \mathcal{E}_{\text{проект}} \quad (88)$$

$$\Delta \mathcal{E} = 2011740 - 509599 = 1502141 \text{ руб./год} \quad (89)$$

5. Показатели экономической эффективности

– Срок окупаемости ($T_{\text{ок}}$)

Показывает, за какой период времени доходы (экономия) покроют затраты на реконструкцию (величина обычно выражается в годах):

$$T_{\text{ок}} = \frac{K}{\Delta \mathcal{E}} \quad (90)$$

$$T_{\text{ок}} = \frac{2516300}{1502141} = 1,67 \text{ года} \quad (91)$$

– Годовой экономический эффект ($\mathcal{E}_{\text{год}}$)

Определяется как чистая экономия от внедрения нового освещения за вычетом нормативной доли капитальных затрат на этот год

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = \Delta \mathcal{E} - K \times E_{\text{н}} \quad (92)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\text{год}} &= 1502141 - 2516300 \times 0,15 = 1502141 - 377445 \\ &= 1124696 \text{ руб./год} \end{aligned} \quad (93)$$

где $E_{\text{н}}$ – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, обычно принимаемый равным 0.15):

Рентабельность инвестиций (ROI или $P_{\text{инв}}$)

Показывает отдачу от вложенных в реконструкцию средств:

$$P_{\text{инв}} = \frac{\Delta \mathcal{E}}{K} \times 100\% \quad (94)$$

$$P_{\text{инв}} = \frac{1502141}{2516300} \times 100\% = 59,7\% \quad (95)$$

Результаты экономической эффективности сведены в таблицу 13

Таблица 13 – Основные технико-экономические показатели проекта

Показатель	Значение
Общая сметная стоимость реконструкции, руб.	2 516 300
Годовая экономия, руб.	1 502 141
Годовой экономический эффективность, руб.	1 124 696
Простой срок окупаемости, лет	1,67 (1 год 8 мес.)
Рентабельность инвестиций, %	59,7

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дипломная работа посвящена реконструкции освещения логистического центра ООО «Лысьваннефтемаш» – комплексной задаче, затрагивающей энергетику, автоматику, охрану труда и экологию.

По результатам работы сформулированы следующие выводы. В теоретической части проведён анализ объекта: логистический центр площадью 5 400 м² (1979 г. постройки) оснащён устаревшими светильниками РСП-05/ДРЛ-400 (400 Вт). Установлено, что действующая система нарушает СанПиН 1.2.3685-21: коэффициент пульсации 65–70% превышает норму 20% в 3,5 раза, индекс цветопередачи $R_a \approx 45$ ниже нормы $R_a \geq 60$. Сравнительный анализ источников света показал превосходство светодиодных над газоразрядными. Рассмотрены принципы построения АСУО на базе контроллеров ОВЕН, обоснованы алгоритмы управления по датчику освещённости и расписанию.

В конструкторском разделе выполнены инженерные расчёты. Светотехнический расчёт (метод коэффициента использования) показал необходимость 104 светильников ELS LED NEO Lite 150 Вт (4 ряда, шаг 6 м). Точечный метод подтвердил минимальную освещённость 222 лк и коэффициент равномерности $U_0 = 0,74$. Электрический расчёт определил мощность после реконструкции – 18,28 кВт (пролёт 15,6 кВт, пристройка 2,68 кВт) против 52 кВт до реконструкции (снижение на 64,8%). Выбраны сечения кабелей и номиналы автоматов. Разработана схема АСУО на базе ПЛК110 с управлением тремя группами через интерфейс 0–10 В по датчикам MODBUS RTU. Выбор решения на базе ОВЕН обеспечивает экономию капитальных затрат не менее 55% по сравнению с готовыми решениями.

В разделе промышленной экологии и охраны труда доказано, что реконструкция переводит рабочие места из класса 3.1 в класс 2 по фактору «световая среда» – все шесть показателей СанПиН выполнены с запасом. Рассмотрен комплекс требований по безопасному производству работ на высоте 9 м (Приказ №782н, группы допуска, СИЗ). Экологическая оценка:

сокращение выбросов CO₂ на 67,5 т/год (–76,4%), исключение ртутьсодержащих отходов, снижение класса опасности отходов с I до IV–V. Проект соответствует ФЗ №261-ФЗ и ESG-стратегии холдинга.

В экономической части рассчитаны показатели эффективности: капитальные затраты – 2 516 300 руб., годовая экономия – 1 502 141 руб., срок окупаемости – 1,67 года (1 год 8 мес.), рентабельность инвестиций – 59,7%, годовой экономический эффект – 1 124 696 руб.

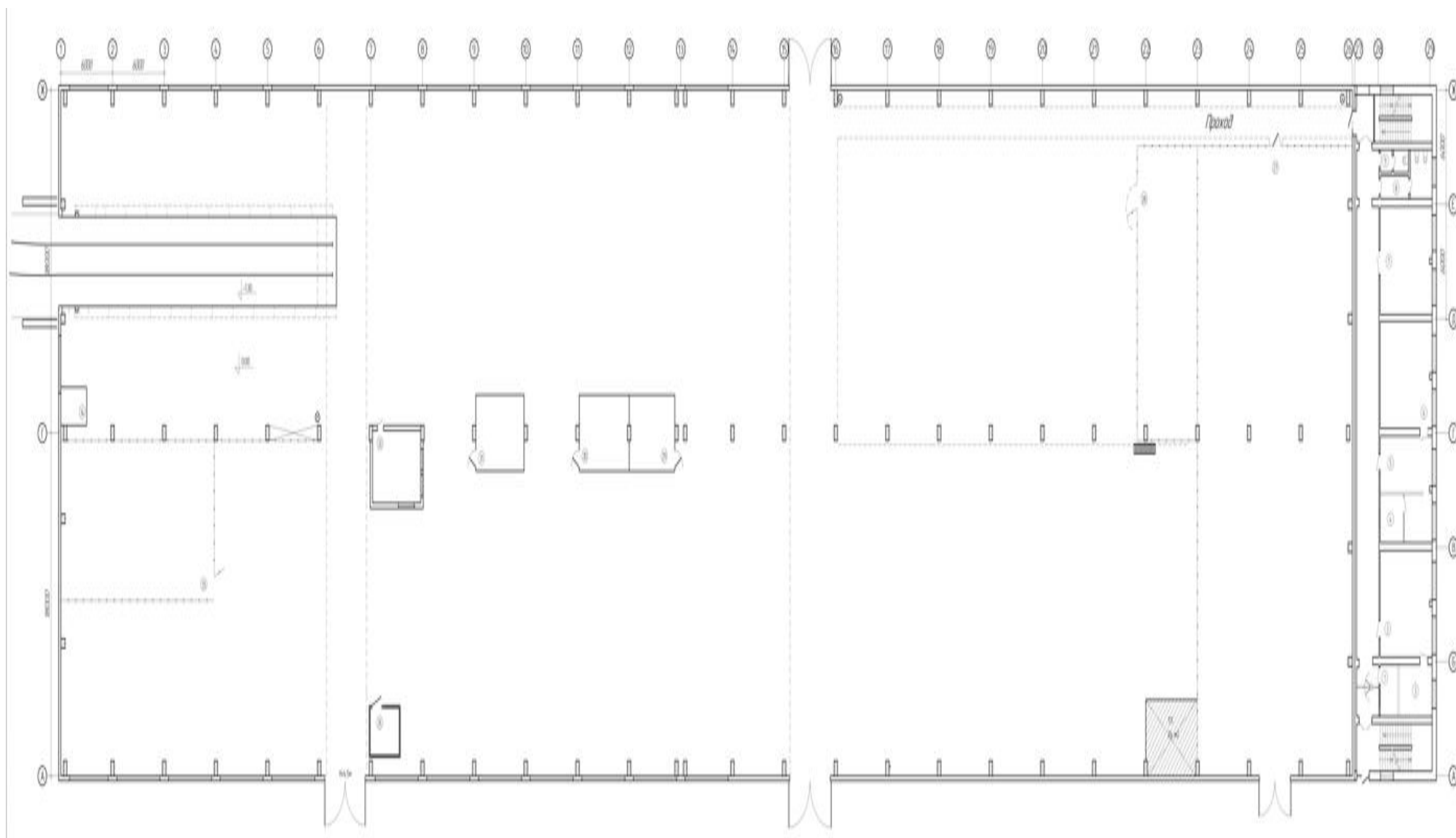
Практическая значимость: разработанный проект может быть непосредственно использован службой главного энергетика предприятия. Все расчёты выполнены на основе реальных данных объекта.

Поставленная цель диплома достигнута в полном объёме. Реконструкция освещения ЛЦ – это переход к современной управляемой энергоэффективной системе, снижающей затраты, улучшающей условия труда и сокращающей экологическую нагрузку.

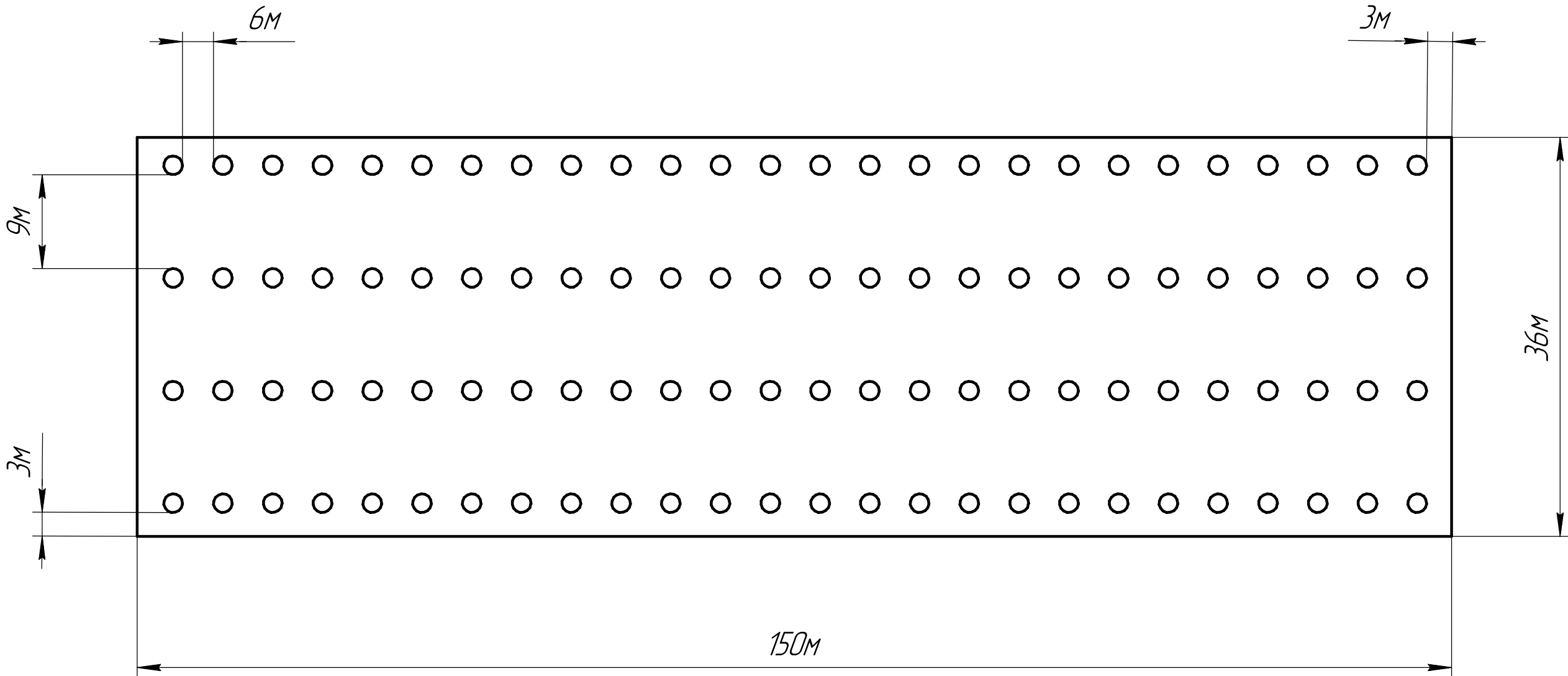
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айзенберг Ю. Б. Справочная книга по светотехнике / под ред. Ю. Б. Айзенберга.— 3-е изд.— М. : Знак, 2006.— 972 с.
2. Кнорринг Г. М. Справочная книга для проектирования электрического освещения / Г. М. Кнорринг, И. М. Фадин, В. Н. Сидоров.— СПб. : Энергоатомиздат, 1992.— 448 с.
3. Козловская В. Б. Электрическое освещение : справочник / В. Б. Козловская, В. Н. Радкевич.— Минск : Техноперспектива, 2007.— 255 с.
4. Константинов Б. А. Светодиодное освещение промышленных объектов / Б. А. Константинов, Д. Е. Лучников.— М. : Инфра-М, 2019.— 312 с.
5. Мешков В. В. Основы светотехники. Ч. 2 / В. В. Мешков, А. Б. Матвеев.— М. : Энергоатомиздат, 1989.— 432 с.
6. Правила устройства электроустановок.— 7-е изд.— М. : Энергосервис, 2002.— 648 с.
7. Сибикин Ю. Д. Электроснабжение промышленных и гражданских зданий / Ю. Д. Сибикин, М. Ю. Сибикин.— М. : Академия, 2016.— 368 с.
8. Сукманов В. И. Программируемые логические контроллеры в системах автоматизации / В. И. Сукманов.— М. : Форум, 2017.— 224 с.
9. Федоров А. А. Основы электроснабжения промышленных предприятий / А. А. Федоров, В. В. Каменева.— М. : Энергоатомиздат, 1984.— 472 с.
10. ГОСТ Р 55710-2013. Освещение рабочих мест внутри зданий [Электронный ресурс].— URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200110081> (дата обращения: 15.04.2025).
11. МУК 4.3.2812-11. Инструментальный контроль освещённости рабочих мест [Электронный ресурс].— URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200089016> (дата обращения: 18.04.2025).
12. Официальный сайт компании ОВЕН. ПЛК110 [Электронный ресурс].— URL: <https://owen.ru/product/plk110> (дата обращения: 10.03.2025).

13. Приказ Минтруда РФ от 16.11.2020 №782н. Правила по охране труда при работе на высоте [Электронный ресурс].– URL: <https://docs.cntd.ru/document/573230511> (дата обращения: 20.04.2025).
14. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы факторов среды обитания [Электронный ресурс].– URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (дата обращения: 14.04.2025).
15. СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение [Электронный ресурс].– URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054197> (дата обращения: 12.04.2025).
16. Федеральный закон от 23.11.2009 №261-ФЗ «Об энергосбережении» [Электронный ресурс].– URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93978/ (дата обращения: 22.04.2025).
17. Федеральный закон от 24.06.1998 №89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» [Электронный ресурс].– URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19109/ (дата обращения: 22.04.2025).



Инд. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инд. № дцкл.	Подп. и дата	Справ. №	Перв. примен.



Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		Лит.	Масса	Масштаб
Разраб.								1:200
Пров.								
Т.контр.						Лист		Листов 1
Н.контр.								
Утв.								