

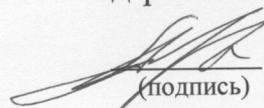
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
МОРДОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМ. Н. П. ОГАРЁВА»

Институт электроники и светотехники

Кафедра источников света

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой  
д-р. техн. наук, доц.

  
(подпись) А. А. Ашрятов

«13» 06 2019 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**  
**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ**  
**СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА ДЛЯ**  
**ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ РАЗЛИЧНОГО**  
**ФУНКЦИОНАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Автор магистерской диссертации



11.06.2019

С. Е. Проничкина

(подпись)

(дата)

Обозначение магистерской диссертации МД-02069964-11.04.04-22-19

Направление 11.04.04 Электроника и нанoeлектроника

Руководитель работы

канд. техн. наук, доц.



11.06.2019

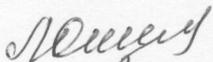
Л. В. Сеницына

(подпись)

(дата)

Нормоконтролер

канд. техн. наук, доц.



11.06.2019

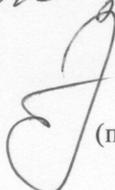
Л. В. Сеницына

(подпись)

(дата)

Рецензент

канд. техн. наук, доц.



14.06.2019

А. А. Горбунов

(подпись)

(дата)

Саранск

2019

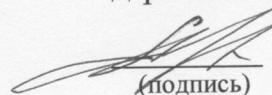
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
МОРДОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМ. Н. П. ОГАРЁВА»

Институт электроники и светотехники

Кафедра источников света

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой  
д-р. техн. наук, доц.

 А. А. Ашрятов  
(подпись)

«16» 09 2017 г.

**ЗАДАНИЕ НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ**

(в форме магистерской диссертации)

Студент Проничкина Светлана Евгеньевна

1 Тема «Разработка методов оценки эффективности светодиодных источников света для производственных помещений различного функционального назначения»

Утверждена приказом № 6864-с от 15.09.2017

2 Срок представления работы к защите 15.06.2019

3 Исходные данные для научного исследования: нормативная документация по освещению производственных помещений; научные публикации в периодической печати; методики экспериментальных исследований – критическая частота слияния световых мельканий, метод корректурных проб и метод экспертных

оценок; экспериментальная исследовательская установка; опытно-экспериментальный светильник со светодиодами второго поколения

#### 4 Содержание пояснительной записки

4.1 Оценка эффективности осветительных установок производственных помещений различного функционального назначения

4.2 Разработка методов исследования эффективности освещения производственных помещений светодиодами

4.3 Разработка программы экспериментальных исследований эффективности освещения светодиодами

4.4 Экспериментальные исследования эффективности осветительных установок при выполнении зрительных работ производственного характера в лабораторных условиях

4.5 Разработка практических рекомендаций

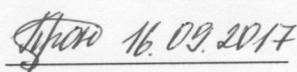
Руководитель работы  
канд. техн. наук, доц.

 16.09.2017

подпись, дата

Л. В. Сеницына

Задание принял к исполнению

 16.09.2017

подпись, дата

## РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация содержит 89 страниц, 14 рисунков, 26 таблиц, 39 использованных источников, 2 приложения

СВЕТОДИОДНОЕ ОСВЕЩЕНИЕ, НОРМИРОВАНИЕ ОСВЕЩЕНИЯ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОСВЕЩЕНИЯ, ПРОГРАММА ИССЛЕДОВАНИЙ, ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, КРИТИЧЕСКАЯ ЧАСТОТА СЛИЯНИЯ СВЕТОВЫХ МЕЛЬКАНИЙ, КОРРЕКТУРНАЯ ПРОБА, СУБЪЕКТИВНАЯ ОЦЕНКА, ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Объектом исследования является эффективность осветительных установок со светодиодами второго поколения.

Цель магистерской диссертации – разработка методов оценки эффективности осветительных установок со светодиодами второго поколения для производственных помещений и проведение экспериментальных исследований.

В результате выполнения магистерского исследования разработаны методы оценки эффективности осветительных установок со светодиодами второго поколения и программа экспериментальных исследований; проведены экспериментальные исследования и анализ полученных результатов; на основе разработанных методов дана оценка эффективности осветительных установок со светодиодами второго поколения; разработаны практические рекомендации по применению светильников со светодиодами второго поколения в производственных помещениях.

Установлено, что освещение СД второго поколения не вызывает негативного действия на орган зрения и организм человека в целом.

Область применения – осветительные установки производственных помещений.

Значимость работы – получение экспериментального материала для нормативной базы освещения производственных помещений светодиодами второго поколения.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1 Оценка эффективности осветительных установок производственных помещений различного функционального назначения	9
1.1 Особенности нормирования промышленного освещения в современных условиях	9
1.2 Подходы к оценке эффективности осветительных установок производственных помещений	19
1.2.1 Метод технико-экономической оценки эффективности	19
1.2.2 Физиолого-гигиенические методы оценки эффективности	21
1.3 Оценка фотобиологической эффективности осветительных установок со светодиодами	31
2 Разработка методов исследования эффективности освещения производственных помещений светодиодами	45
3 Разработка программы экспериментальных исследований эффективности освещения светодиодами	49
3.1 Экспериментальная исследовательская установка	49
3.2 Выбор модели зрительной работы	53
3.3 Разработка методики проведения экспериментальных исследований	55
3.4 Статистическая обработка результатов эксперимента	57
3.5 План экспериментальных исследований	58
4 Экспериментальные исследования эффективности осветительных установок при выполнении зрительных работ производственного характера в лабораторных условиях	60
4.1 Исследования производительности зрительных работ	60
4.2 Исследования критической частоты слияния световых мельканий	61
4.3 Исследования зрительной работоспособности (метод коррек-	

турных проб)	68
4.4 Исследования условий освещения методом экспертных оценок	76
5 Разработка практических рекомендаций	81
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	84
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	86
ПРИЛОЖЕНИЕ А (справочное) Образцы протоколов измерения	90
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (справочное) Образец анкеты субъективной оценки световой среды	92

## ВВЕДЕНИЕ

Внедрение систем освещения на основе светодиодов создает условия для повышения эффективности осветительных установок производственных помещений, в первую очередь технико-экономической. Однако при этом также необходим экспериментальный материал по исследованию функциональных показателей органа зрения и организма человека в целом, а также зрительной работоспособности, позволяющий оценить эффективность освещения светодиодами. Для получения такого материала необходимо разработать и обосновать метод научных исследований, позволяющий дать оценку эффективности осветительных установок со светодиодами для производственных помещений. Причем речь идет о светодиодах второго поколения, исследования гигиенической эффективности которых пока не проводилось. В научной печати практически отсутствуют материалы работ, посвященных психофизиологическим и гигиеническим исследованиям световой среды, создаваемой осветительными приборами со светодиодами второго поколения. Это определяет актуальность магистерского исследования по оценке условий освещения данными источниками света и подтверждения отсутствия негативного воздействия их излучения на орган зрения и организм человека в целом.

Комплексные психофизиологические и гигиенические исследования, проведенные с использованием разработанного метода оценки эффективности условий освещения, создаваемых светодиодами второго поколения, позволят создать базу для нормирования светодиодного освещения и соответственно для обоснованного определения областей применения светодиодных источников света.

Цель магистерской диссертации – разработка методов оценки эффективности осветительных установок со светодиодами второго поколения для производственных помещений и проведение экспериментальных исследований.

Задачи магистерской диссертации:

- исследование особенностей нормирования промышленного освещения в современных условиях;
- анализ физиолого-гигиенических методов и исследований оценки эффективности осветительных установок производственных помещений;
- разработка метода оценки эффективности осветительных установок со светодиодами для производственных помещений;
- исследование экспериментальной исследовательской установки и выбор модели зрительной работы;
- разработка методики и программы экспериментальных исследований эффективности освещения светодиодами;
- проведение и анализ экспериментальных исследований производительности зрительных работ, критической частоты слияния световых мельканий, зрительной работоспособности (метод корректурных проб) и анкет субъективной оценки условий освещения (метод экспертных оценок);
- оценка эффективности осветительных установок со светодиодами второго поколения и разработка практических рекомендаций.

Новизна данного магистерского исследования заключается в том, что впервые будут проведены экспериментальные исследования эффективности освещения светодиодами второго поколения для производственных помещений различного функционального назначения.

# **1 Оценка эффективности осветительных установок производственных помещений различного функционального назначения**

## **1.1 Особенности нормирования промышленного освещения в современных условиях**

При выполнении зрительно-напряженных работ на производстве предъявляются повышенные требования к характеристикам источников света (ИС) и осветительных приборов (ОП). Выполненное по нормативным требованиям освещение рабочих мест производственных помещений обеспечивает оптимальные условия труда, исключает быстрое утомление органа зрения, повышает производительность труда, уменьшает количество брака, снижает риск производственного травматизма и развития профессиональных заболеваний.

Добиться решения проблем, связанных с энергосбережением, позволили ОП со светодиодными ИС и установки на их основе.

Высокая световая отдача и продолжительность срока службы светодиодов (СД), а также стремительный прогресс в развитии систем на их основе не оставляют сомнений в расширении областей применения СД в освещении. Однако база для нормирования светодиодного освещения формируется медленными темпами. Это отчасти связано с исследованиями ученых-гигиенистов белых СД, в результате которых была выявлена опасность для органа зрения из-за достаточно интенсивной синей составляющей в спектре СД.

В настоящее время в нашей стране искусственное освещение регламентируется нормативными документами:

- СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение» [35];
- ГОСТ Р 55710-2013 «Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерений» [11];
- СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах» [33] и др.

В этих документах СД указываются как рекомендуемые ИС.

При проектировании осветительных установок (ОУ) для исключения или снижения уровня отраженной блескости необходимо обеспечивать правильное взаимное расположение светильников и рабочей поверхности, ограничение яркости и/или увеличение светящей части поверхности светильников, учитывать коэффициенты отражения материалов отделки потолка и стен.

Значения защитных углов отражателей и экранирующих решеток ОП в зависимости от яркости ИС приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения защитных углов отражателей и экранирующих решеток ОП

Яркость ИС, ккд/м <sup>2</sup>	Защитный угол, не более
Св. 20 до 50 включ.	15°
» 50 » 500 »	20°
» 500	30°
Примечание – Приведенные значения не распространяются на ОП отраженного света и ОП, расположенные ниже линии зрения.	

Яркость рабочей поверхности не должна превышать значений, указанных в таблице 2.

Таблица 2 – Наибольшая допустимая яркость рабочих поверхностей по условиям отраженной блескости

Площадь рабочей поверхности, м <sup>2</sup>	Наибольшая допустимая яркость, кд/м <sup>2</sup>
Менее 0,0001	2000
От 0,0001 до 0,001	1500
От 0,001 до 0,01	1000
От 0,01 до 0,1	750
Более 0,1	500

Коэффициент пульсации освещенности  $K_p$  в помещениях, где возможно возникновение стробоскопического эффекта и есть опасность прикосновения к вращающимся или вибрирующим объектам, – не более 10 %. Коэффициент пульсации не нормируют в помещениях с временным пребыванием людей при отсутствии условий для возникновения стробоскопического эффекта.

Нормы освещенности  $E_{\text{экс}}$  и равномерности освещенности  $U_0$  в зоне зрительной работы независимо от плоскости нормирования (горизонтальной, вертикальной или наклонной), коэффициента пульсации освещенности  $K_{\text{п}}$ , объединенного показателя дискомфорта  $UGR$  и общего индекса цветопередачи  $R_a$  ИС для производственных помещений и вида зрительной работы по [11] приведены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3 – Электротехническая промышленность

Наименование зрительной работы и вида деятельности	$E_{\text{экс}}$ , лк	$U_0$ , не менее	$UGR$ , не более	$R_a$ , не менее	$K_{\text{п}}$ , %, не более
Изготовление кабелей и проводов	300	0,60	25	80	20
Намотка на катушки:					
– большие	300	0,60	25		20
– средние	500	0,60	22		15
– малые	750	0,70	19		10
Пропитка катушек	300	0,60	25		20
Гальваника	300		25		
Монтажные операции:					
– грубые	300	0,60	25		20
– средней точности	500	0,60	22		15
– высокой точности	750	0,70	19	10	
– сверхточные	1000	0,70	16	10	
Производство электронной техники, испытание и контроль	1500	0,70	16		10

Таблица 4 – Металлообработка

Наименование помещения, зрительной работы и вида деятельности	$E_{\text{экс}}$ , лк	$U_0$ , не менее	$UGR$ , не более	$R_a$ , не менее	$K_{\text{п}}$ , %, не более
Открытаяковка (штамповка)	200	0,60	25	80	20
Штамповка с понижением температуры	300				
Сварка	300				
Работы грубой и средней точности: размер объекта различения $\geq 0,1$ мм	300		22		

Окончание таблицы 4

Наименование помещения, зрительной работы и вида деятельности	$E_{\text{экс}}$ , лк	$U_0$ , не менее	$UGR$ , не более	$R_a$ , не менее	$K_p$ , %, не более
Очень точные работы: размер объекта различения < 0,1 мм	500	0,70	19	80	10
Контроль	750				
Метало- и трубопрокатные цеха, холодная формовка	300	0,60	25		20
Механическая обработка листов толщиной более 5 мм	200				–
Ручная обработка листов толщиной менее 5 мм	300		22		15
Инструментальные работы на оборудовании для резки	750	0,70	19		10
Сборка: - грубая; - средняя; - точная; - высокоточная	200	0,60	25		20
	300	0,60	25		20
	500	0,60	22		15
	750	0,70	19		10
Гальванизация	300	0,60	25	20	
Обработка поверхности и окраска	750	0,70		19	10
Изготовление шаблонов, ручного инструмента, точная механика, микромеханика	1000				

На рабочих местах, где предъявляются требования к цветопередаче (текстильные, радиоэлектронные, полиграфические производства и т.п.) для искусственного освещения следует применять ИС с индексом цветопередачи 85 %.

Требования к освещению помещений промышленных предприятий по [35] представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Требования к освещению помещений промышленных предприятий

Характеристика зрительной работы	Наименьший или эквивалентный размер объекта различения, мм	Разряд зрительной работы	Подразряд зрительной работы	Контраст объекта с фоном	Характеристика фона	Искусственное освещение				
						Освещенность, лк			Сочетание нормируемых величин объединенного показателя дискомфорта UGR и коэффициента пульсации	
						При системе комбинированного освещения		При системе общего освещения		
						всего	В том числе от общего		UGR, не более	Кп, %, не более
Наивысшей точности	Менее 0,15	I	а	Малый	Темный	5000	500	–	19	10
			б	Малый Средний	Средний Темный	4000	400	1250	19	10
			в	Малый Средний Большой	Светлый Средний Темный	2500	300	750	19	10
			г	Средний Большой Большой	Светлый Светлый Средний	1500	200	500	19	10
Очень высокой точности	От 0,15 до 0,30	II	а	Малый	Темный	4000	400	–	22	10
			б	Малый Средний	Средний Темный	3000	300	750	22	10
			в	Малый Средний Большой	Светлый Средний Темный	2000	200	500	22	10
			г	Средний Большой Большой	Светлый Светлый Средний	1000	200	400	22	10
Высокой точности	От 0,30 до 0,50	III	а	Малый	Темный	2000	200	500	25	15
			б	Малый Средний	Средний Темный	1000	200	400	25	15

Продолжение таблицы 5

Характеристика зрительной работы	Наименьший или эквивалентный размер объекта различения, мм	Разряд зрительной работы	Подразряд зрительной работы	Контраст объекта с фоном	Характеристика фона	Искусственное освещение				
						Освещенность, лк			Сочетание нормируемых величин объединенного показателя дискомфорта UGR и коэффициента пульсации	
						При системе комбинированного освещения		При системе общего освещения	UGR, не более	Кп, %, не более
						всего	В том числе от общего			
Высокой точности	От 0,30 до 0,50	III	в	Малый Средний Большой	Светлый Средний Темный	750	200	300	25	15
			г	Средний Большой Большой	Светлый Светлый Средний	400	200	200	25	15
Средней точности	Св. 0,5 до 1,0	IV	а	Малый	Темный	750	200	400	25	20
			б	Малый Средний	Средний Темный	500	200	300	25	20
			в	Малый Средний Большой	Светлый Средний Темный	400	200	200	25	20
			г	Средний Большой Большой	Светлый Светлый Средний	–	–	200	25	20
Малой точности	Св. 1 до 5	V	а	Малый	Темный	400	200	300	25	20
			б	Малый Средний	Средний Темный	–	–	200	25	20
			в	Малый Средний Большой	Светлый Средний Темный	–	–	200	25	20
			г	Средний Большой Большой	Светлый Светлый Средний	–	–	200	25	20

Окончание таблицы 5

Характеристика зрительной работы	Наименьший или эквивалентный размер объекта различения, мм	Разряд зрительной работы	Подразряд зрительной работы	Контраст объекта с фоном	Характеристика фона	Искусственное освещение				
						Освещенность, лк			Сочетание нормируемых величин объединенного показателя дискомфорта UGR и коэффициента пульсации	
						При системе комбинированного освещения		При системе общего освещения		
						всего	В том числе от общего		UGR, не более	Кп, %, не более
Грубая (очень малой точности)	Более 5	VI	–	Независимо от характеристик фона и контраста объекта с фоном	–	–	200	25	20	
Работа со светящимися материалами и изделиями в горячих цехах	Более 0,5	VII	–	То же	–	–	200	25	20	
Общее наблюдение за ходом производственного процесса: постоянное; периодическое при постоянном пребывании людей в помещении; то же, при периодическом; общее наблюдение за инженерными коммуникациями		VIII	а	Независимо от характеристик фона и контраста объекта с фоном	–	200	28	20	3,0	
			б	То же	–	75	28	–	1,0	
			в	–	–	50	–	–	0,7	
			г	–	–	20	–	–	0,3	

Сравнивая нормативные требования к искусственному освещению производственных помещений (таблица 6) в [35] и [11], необходимо отметить, что возможны противоречия в количественных показателях нормируемых параметров. Например, по [11] в производственных помещениях при выполнении тонких работ при производстве керамики и стекла, сверхточных монтажных операций, печати в типографии, изготовлении шаблонов, ручного инструмента, точной механики, микромеханики – эксплуатационная освещенность равна 1000 лк; при изготовлении и обработке искусственных драгоценных камней, производстве электронной техники, ручной сборки часов – 1500 лк; стальном и медном гравировании в типографии – 2000 лк. А по [35] при выполнении зрительных работ наивысшей точности с наименьшим объектом различения менее 0,15 мм и при подразряде зрительной работы «б» средняя освещенность при общем освещении равна 1250 лк, при комбинированном освещении – 4000 лк, а при подряде «а» для общего освещения не нормируется, для комбинированного – 5000 лк. Следовательно, разные подходы в нормативных документах к определению вида и условий выполнения зрительной работы, могут привести к реализации недостаточно качественного освещения, особенно при прецизионных работах.

Таблица 6 – Сравнение нормативных требований к искусственному освещению производственных помещений

Вид нормативного документа	Характеристика зрительной работы	Освещенность, лк При системе общего (комбинированного) освещения	<i>UGR</i> , не более	$K_p$ , %, не более
СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение»	Наивысшей точности (наименьший или эквивалентный размер объекта различения менее 0,15 мм) Подразряд зрительной работы а б в г	– (5000) 1250 (4000) 750 (2500) 500 (1500)	19	10

Окончание таблицы 6

Вид нормативного документа	Характеристика зрительной работы	Освещенность, лк При системе общего (комбинированного) освещения	$UGR$ , не более	$K_p$ , %, не более
ГОСТ Р 55710-2013 «Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерений»	Шлифовка, гравировка, полировка стекла	750	19	10
	Раскрой, отделка, контроль в химической, пластмассовой и резиновой промышленности			
	Намотка на малые катушки, монтажные операции высокой точности			
	Инструментальные работы на оборудовании для резки, высокоточная сборка			
	Тонкие работы, в т.ч. ручная роспись в производстве керамики, плит, стекла и изделий из них	1000	16	10
	Контроль цвета в химической, пластмассовой и резиновой промышленности			
	Сверхточные монтажные операции			
	Изготовление шаблонов, ручного инструмента, точная механика, микромеханика	1500		
	Изготовление ювелирных изделий			
	Производство электронной техники, испытание и контроль			
Изготовление и обработка искусственных драгоценных камней, ручная сборка часов				

По [35] для общего освещения помещений рекомендуются ОП со светодиодными ИС и светодиодными модулями со световой отдачей ( $\eta$ ) не менее 90 лм/Вт при  $R_a \geq 80$  и со световой отдачей не менее 100 лм/Вт при  $R_a \geq 60$ .

По [12] световая отдача светильников с СД потребляемой мощностью не менее 30 Вт должна быть не менее 85 лм/Вт.

В таблице 7 приведены требования к минимальным значениям световой отдачи ( $\eta_{\min}$ ) светильников с СД [28].

Таблица 7 – Минимальные нормированные значения световой отдачи светильников с СД

Назначение	Конструкция	Номинальная мощность, Вт	$\eta_{\min}$ , лм/Вт	
			Этап 1	Этап 2
Светильники для производственных помещений	Диффузный рассеиватель	Не более 25	75	95
		Более 25	85	105
	Прозрачный (призматический) рассеиватель	Не более 25	80	100
		Более 25	85	105
С открытым выходным отверстием	Не более 25	80	100	
	Более 25	90	110	
	Типа Downlight	Более 5	60	75

При сравнении требований по световой отдаче светильников с СД в различных нормативных документах необходимо отметить, что только в [28] учитывается конструкция и мощность светильников, что является более корректным.

Несмотря на противоречащие результаты исследований о возможной фотобиологической опасности СД и очевидной необходимости для новых ИС проведения санитарно-эпидемиологической экспертизы перед их внесением в нормативные документы [33], в действующих нормативных документах РФ по освещению рекомендуется использовать СД для общего и местного освещения с коррелированной цветовой температурой (КЦТ) от 2400 до 6500 К. Как и для других ИС, в СД интенсивность ультрафиолетового излучения в диапазоне длин волн 320 – 400 нм не должна превышать  $0,03 \text{ Вт/м}^2$ , и не допускается наличие в спектре излучения длин волн менее 320 нм.

Нормативные документы в РФ разрабатываются различными организациями и не координируются единым органом. Поэтому в них встречаются противоречия по требованиям, в том числе для ОУ со СД; не всегда учитывается современный уровень развития светотехники и результаты научных исследований в области физиологии зрения человека. Подобный подход в нормировании освещения нуждается в существенной коррекции.

## 1.2 Подходы к оценке эффективности осветительных установок производственных помещений

Среди основных методов оценки эффективности ОУ производственных помещений можно выделить технико-экономические и физиолого-гигиенические.

### 1.2.1 Метод технико-экономической оценки эффективности

Метод технико-экономического нормирования, предложенный профессором Трухановым А. А., базируется на том, что каждому виду зрительной работы должна соответствовать освещенность, при которой экономический эффект будет максимален.

Для расчета экономической эффективности предложенных вариантов ОУ проводится расчет полных приведённых затрат на ОУ (капитальные затраты и эксплуатационные расходы).

Полные приведённые затраты ( $Q_p$ ) могут быть определены по формуле

$$Q_p = 0,15 \cdot \sum K + \sum \text{Э}, \quad (1)$$

где  $K$  – капитальные затраты, руб.;

$\text{Э}$  – годовые эксплуатационные расходы, руб.

Капитальные затраты ( $K$ ) на ОУ определяются по формуле:

$$K = N(An + B + M + 0,001\alpha PCn), \quad (2)$$

где  $N$  – число светильников одного типа, шт.;

$A$  – цена одной лампы, руб.;

$n$  – число ламп в одном светильнике, шт.;

$P$  – мощность одной лампы, Вт;

$B$  – цена одного светового прибора, руб.;

$M$  – стоимость монтажа одного светильника, руб.;

$C$  – стоимость монтажа электротехнической части ОУ на 1 кВт установленной мощности ламп и потерь в ПРА (для установок с РЛ), руб/кВт;

$\alpha$  – коэффициент, учитывающий потери мощности в сетях и ПРА.

Годовые эксплуатационные расходы ( $\mathcal{E}$ ) для одного типа световых приборов определяются по формуле:

$$\mathcal{E} = (C_{AM} + C_L + C_q + C_3) \cdot N, \quad (3)$$

где  $C_{AM}$  – амортизационные отчисления, руб.;

$$C_{AM} = 0,1 \cdot (B + M), \quad (4)$$

где  $C_L$  – стоимость эксплуатации ламп, руб.;

$$C_L = \left(\frac{T}{\tau}\right) \cdot (A + \alpha) \cdot n, \quad (5)$$

где  $\alpha$  – стоимость замены ламп,  $\alpha = 0,7 \cdot B$ , руб.;

$$C_q = m \cdot B, \quad (6)$$

где  $C_q$  – стоимость чистки светильников, руб.;

$B$  – стоимость чистки одного светильника;

$m$  – количество чисток в год (для наружного освещения не реже двух раз в год);

$$C_3 = 0,001\alpha \cdot T \cdot p \cdot q \cdot n, \quad (7)$$

где  $T$  – число часов использования максимума осветительной нагрузки в год для помещений с естественным освещением, ч;

$q$  – тариф на электроэнергию, руб. за 1 кВт·ч.;

$n$  – число ламп, шт.

### **1.2.2 Физиолого-гигиенические методы оценки эффективности**

Для создания эффективного освещения, обеспечивающего продуктивную зрительную деятельность, способствующего снижению утомления и уменьшению ошибок в работе необходимо, чтобы параметры ОУ, технические решения по выбору средств и способов их осуществления были обоснованы с точки зрения физиолого-гигиенических требований. Особенно важно решение этих вопросов при внедрении СД ИС, которые имеют свои специфические особенности спектра излучения.

Выбор критериев для оценки функционального состояния зрительного анализатора в исследуемых условиях тесно связан с вопросами определения и физиологической сущности зрительного утомления (ЗУ). Определение ЗУ широко трактуется различными авторами. Так наиболее распространенное определение характеризует этот процесс, как состояние человека, вызванное интенсивной или длительной работой, сопровождающееся временным уменьшением работоспособности, выражающемся в снижении количества и качества работы и в ухудшении координации рабочих функций. Согласно современной центрально-корковой теории утомления, утомление при мышечной работе человека есть целостный процесс с центрально-корковым ведущим звеном, представляющий по биологической сущности корковую защитную реакцию, а по физиологическому механизму – уменьшение работоспособности прежде всего самих корковых клеток. Такое понятие утомления полностью подходит и к утомлению, которое развивается в результате выполнения точных зрительных операций, в подавляющем большинстве случаев состоящих из элементов как мышечной, так и умственной работы.

В качестве причин ЗУ могут выступать факторы, связанные как с условиями деятельности (освещенность, спектральный состав, контраст, блескость и т. д.), так и обусловленные внутренним состоянием зрительной сенсорной системы, в том числе и рефракционными нарушениями.

ЗУ может сказываться в снижении зрительной работоспособности (ЗР), а также в повышении напряженности организма при выполнении зрительной работы. Характерным примером второй разновидности проявления ЗУ могут явиться факты повышения зрительных ошибок при одновременном росте производительности труда (ПТ) в результате улучшения условий освещения рабочего места. Существует возможность роста утомления за счет дополнительного напряжения организма, возникающего в результате сокращения времени на отдельные зрительные операции.

Исследуя общее утомление по частоте пороговой слышимости и ПТ несложной зрительной работы (сортировка бусинок ( $\alpha=10'$ , контраст высокий)), авторы [39] делают вывод, что ПТ не может служить критерием оценки утомления. С этим можно полностью согласиться, так как максимальная ПТ отмечается при работе глаза – "на пределе", а ЗУ в этом случае возрастает. Оптимальные условия для работы создаются при минимальном утомлении и высоком уровне ПТ.

Результатом ЗУ может быть снижение активности сетчатой оболочки, глазных мышц и изменение центрального зрения. По мере роста утомления могут наблюдаться разнообразные болевые ощущения в области глаз, чувство давления и боли в глазных яблоках, светобоязнь, рези и расплывание объектов. У работников прецизионного труда отмечается снижение объема абсолютной аккомодации, приближение дальней и удаление ближней точек ясного видения, уменьшения объема относительной аккомодации. При повышенном утомлении наблюдаются значительные изменения в протекании различных психических процессов. Это проявляется в увеличении порогов чувствительности, снижении критической частоты световых мельканий (КЧСМ), возрастании яркости и длительности последовательных образов. Возрастание утомления сказывается на

снижении ПТ, ухудшении качества выпускаемой продукции, повышении количества ошибок, отклонений от нормы отдельных функций, характеризующих общее состояние человека.

Именно ЗУ – является адекватным критерием оценки световой среды, поэтому при выполнении напряженных зрительных работ приоритет должен быть отдан принципу оценки условий освещения с учетом ЗУ, по относительному изменению зрительных функций.

При оценке воздействия факторов внешней среды, например, освещенности, спектрального состава на работоспособность важно учитывать основные закономерности взаимоотношения процессов утомления и восстановления:

- работоспособность органов и тканей определяется отношением процессов истощения и восстановления;
- при длительной или напряженной деятельности все органы и ткани утомляются;
- восстановление включает в себя нарастание работоспособности до нормы и процесс упрочения восстановления;
- при некоторых условиях утомление может вызвать патологические процессы и состояния.

Аналитический обзор исследовательских работ позволяет выделить комплекс методик исследований профессионально значимых звеньев зрительного анализатора при выполнении зрительных задач в условиях освещения.

Мышечное утомление соответствующих звеньев зрительного анализатора в наиболее полном виде может быть выявлено с помощью различных аккомодативных тестов и аккомодативной конвергенции. Для определения положения дальней точки ясного видения используют и субъективные (с помощью таблицы Головина-Сивцева) и объективные (скиаскопия, рефрактометрия) методы. Объем абсолютной аккомодации, является важнейшей характеристикой функционального состояния органа зрения, и по его изменению в процессе зрительной нагрузки можно судить о степени ЗУ в тех или иных условиях освещения.

Одним из ранних методов обнаружения ЗУ при исследуемых условиях может быть установление наличия изменения в реакции рецепторов зрительного анализатора. Большое значение как метод функциональной диагностики, позволяющей судить о состоянии рецепторного аппарата имеет исследование поля зрения. В [37] было применено периметрическое определение границ полей зрения для исследования механизма действия пульсаций светового потока газоразрядных ламп, в частности их влияния на фоторецепторные элементы сетчатки. Определялись границы поля зрения на белый и красный свет в различных меридианах через каждые  $45^\circ$  (монокулярно, для правого глаза) при одинаковой освещенности 500 лк. Проведенные наблюдения свидетельствовали о сужении границ чувствительных к свету зон сетчатки при увеличении глубины колебаний светового потока; отмечено сужение площади цветочувствительности. По результатам этой работы был сделан вывод о том, что определение границ полей зрения методом периметрии может быть использовано для целей гигиены освещения.

Рядом авторов [25] отмечается информативность кампиметрии о функциональном состоянии сетчатки и зрительного нерва. При этом методе на плоскости исследуются дефекты в центральном отделе поля зрения, в частности, форма и размеры слепого пятна.

Важнейшей характеристикой функционального состояния сетчатки, центрального зрения является острота зрения (острота различения). Для измерения остроты различения используют тест-объекты, которые представляют собой различные фигуры и буквы. Международным тестом являются кольца Ландольта, пропорции которого определяются стандартными соотношениями. Для быстроты определения остроты различения используются таблицы, каждая сторона которых содержит буквы или знаки определенного размера, или оптические миры, различение штрихов которых также позволяет определить разрешаемый срок.

Остроту зрения можно считать фундаментальной функцией, определяющей ЗР, но в тоже время она не несет в себе переменного компонента времени,

а из этого можно сделать вывод о том, что острота зрения не может являться мерой ЗУ органа зрения.

Одной из функций, позволяющей оценить состояние рецепторного аппарата, является контрастная светочувствительность. Она определяется такими факторами, как концентрация светочувствительного вещества структуры сетчатки, уровень нервной проводимости и т.п., что позволяет выбрать ее одним из критериев оценки функционального состояния рецепторного аппарата органа зрения. В [24] было установлено, что контрастная чувствительность является наиболее уязвимой функцией при воздействии блескости, в то время как другие обследованные функции (острота зрения, скорость зрительного восприятия, УЯВ) изменяются в значительно меньшей степени.

Вместе с тем отмечается [21], что контрастная чувствительность меньше изменяется при выполнении точных зрительных работ, поэтому ее нецелесообразно использовать для оценки утомления органа зрения.

Напряженная зрительная работа приводит к ряду существенных сдвигов не только в состоянии зрительного анализатора, но и в нервной деятельности работающего. В [27] в результате экспериментальных исследований показано, что при напряженной зрительной работе на выбор параметров освещения состояние центрально-нервной системы (ЦНС) оказывает большее влияние, чем состояние зрительных функций.

Многими исследователями для выявления утомления центрального отдела используется метод определения возбудимости сенсорной сферы коры головного мозга, в частности по такому временному показателю возбудимости, как КЧСМ [26, 37].

Подробно исследовалась КЧСМ в [21]. Было установлено, что эта зрительная функция зависит от многих факторов, таких как: яркость наблюдаемой картины; отношение светлой части периода ко всему периоду; глубина модуляций яркости при мельканиях (амплитуда модуляций); угловой размер поля зрения; форма кривой, выражающей повышение и понижение яркости в процессе мельканий.

Большинство исследователей отмечают, что этот показатель очень чувствителен к воздействию нагрузки и к условиям освещения, а, следовательно, может служить мерой ЗУ коркового отдела органа зрения и объективно характеризовать динамику ЗР [8, 26].

Электрофизиологические методы исследований [9, 18] характеризуются высокой точностью и поддаются автоматической количественной оценке. Они не связаны с субъективным отчетом испытуемых, их профессией, предшествующим опытом, восприятием содержания зрительной информации и не требуют никакого напряжения внимания, мышления и самих зрительных функций зрения. Все это позволяет в более чистом виде определять влияние на человека как отдельных, так и комплексных характеристик освещения.

Функциональное состояние организма является интегральным показателем его адаптационно-приспособительной деятельности. Воздействие неблагоприятных факторов среды, в том числе и освещения, сопровождается значительным напряжением регуляторных систем организма, что ведет к снижению функциональных возможностей организма, к возникновению явлений дезадаптации. Это проявляется в виде различных нарушений в регуляции вегетативной нервной системы и сосудистого тонуса.

Для оценки функционального состояния организма важными методами являются метод электрокардиографического (ЭКГ) исследования и методы комплексной оценки состояния сердечно-сосудистой системы (ССС).

Частота сердечных сокращений (ЧСС) зависит от многих факторов, включая возраст, пол, условия окружающей среды, функциональное состояние, положение тела. Отмечается линейная зависимость между ЧСС и интенсивностью работы.

Исследования и практический опыт [34] свидетельствуют, что среди простых и легко доступных показателей наиболее информативным и тесно коррелирующими с величиной максимального потребления кислорода является индекс «двойное произведение» – индекс Робинсона, который определяется как

$$\text{ИДП} = \text{ЧСС} \times \text{САД} / 100, \quad (8)$$

где ЧСС – частота сердечных сокращений (ударов в минуту);

САД – систолическое артериальное давление (мм рт. ст.).

Индекс Робинсона (двойное произведение) – индекс работы сердца. Он отражает уровень гемодинамической нагрузки на ССС и характеризует работу сердечной мышцы. Среднее значение индекса составляет 81 – 90, выше среднего – 80 – 75, высокое – 74, низкое – 101 и выше. Чем ниже ИДП в покое, тем выше максимальные аэробные возможности и уровень соматического здоровья.

При обосновании интегральных показателей эффективности освещения целесообразно, чтобы показатель ЗР включал действие результирующей функции мозга и глаза. При этом под ЗР можно понимать способность выполнять специфическую зрительно-аналитическую работу с допустимым в единицу времени числом негрубых ошибок на протяжении любого отрезка рабочего цикла. Наиболее приемлемым тестом для интегральной оценки работоспособности в различных условиях деятельности человека является так называемая корректурная проба, которая может быть составлена из букв или буквенных сочетаний, цифр, а также геометрических фигур или иметь вид лабиринта. Преимущественная черта таких тестов – их большая простота и динамичность. Корректурная проба позволяет оценить продуктивность работы по точности выполнения задачи и затраченному времени, а также состояние высшей нервной деятельности по ряду показателей таких как условное, дифференцированное, запаздывающее торможения и др. В этих случаях испытуемым даются либо неповторяющиеся варианты корректурных таблиц для исключения привыкания и автоматизма в работе, либо различные задания, осложняющие их выполнение. Например, количество пропусков и ошибок при вычеркивании какой-либо буквы при условии, что перед ней стоит строго определенная буква, будет показателем силы внутреннего условного торможения и т. д.

Однако следует иметь в виду, что метод корректурной пробы не учитывает остроту зрения, работу аккомодации, состояние зрительных функций и их

взаимодействие. Как правило, напряженная зрительная работа приводит к функциональным сдвигам в сенсорных системах. Однако это еще не равнозначно нарушению работоспособности. Кризис может наступить, когда физиологическое утомление переходит в свою крайность – переутомление, что и приводит к «сбою» в работе зрительного анализатора (существенные потери в сенсорном восприятии, грубые ошибки в переработке информации и т. д.).

Обработка зрительных корректурных таблиц производится по формулам Г. М. Уиппла, которые позволяют рассчитывать коэффициенты работоспособности и точности [29].

Целесообразность использования этого метода подчеркивается многими учеными [30, 36]. В настоящее время исследователями применяется корректурный метод с использованием таблиц Анфимова, тестов Платонова на концентрацию и распределение внимания, тестов Вестона для установления времени переработки информации и некоторых других [23, 32]. В [36] подчеркивается, что метод корректурных проб с использованием таблиц Анфимова обладает рядом преимуществ по сравнению с другими, так как значительное количество методов характеризует не столько продуктивность зрительной работы, сколько внимание. Формулы Уиппла позволяют регистрировать и внимание, или точность работы, и общую продуктивность зрительной деятельности. Поскольку эти показатели не всегда изменяются однонаправлено в процессе деятельности работника, то это позволяет дать всестороннюю оценку сдвигам в ЦНС под воздействием зрительной нагрузки при определенной продолжительности и различных условиях искусственного освещения.

В целом следует учитывать, что величина работоспособности сама по себе не характеризует функционального состояния организма, а является лишь одним из его важных показателей.

Существующий практический опыт использования для оценки условий освещения корректурных тестов как одной из методик исследования высшей нервной деятельности подтверждается изучением влияния излучения различных ИС на функциональное состояние коры головного мозга [3, 9, 31].

Анализ приведенного материала по использованию метода корректурных проб в практике оценки условий освещения убедительно показывает эффективность его применения не только для гигиенических исследований излучения, поскольку характер ошибок в известной степени позволяет судить о некоторых сторонах нейродинамики коры головного мозга, но и для моделирования зрительной работы.

Использование только интегральных показателей не дает исчерпывающей оценки утомления. В качестве меры утомления целесообразнее использовать изменение наиболее чувствительной функции зрения. Можно отдать предпочтение способу измерения утомления по снижению времени ахроматической адиспаропии.

Известно, что глаз реагирует не на абсолютные значения возбудителя, а лишь на его изменения. Поэтому, если изображения при любых произвольных и непроизвольных микро- и макродвижениях глаза остается неподвижным относительно сетчатки, то зрительное ощущение быстро исчезает. Следовательно, два различных по яркости или цвету контактирующих поля, наблюдаемых одновременно, могут в некоторых условиях восприниматься как одинаковые. Такая ситуация может возникнуть, например, в условиях ограничения возможных движений глазного яблока за счет фиксации линии зрения наблюдателя.

Случаи, в которых возможно возникновение ахроматической адиспаропии, встречаются в производственных условиях достаточно часто. На многих производственных операциях по контролю изделий и, особенно при точной сборке и ручной обработке деталей имеет место достаточно длительная (порядка нескольких секунд, а иногда и более) фиксация линии зрения на некоторой точке. При этом необходимо осуществлять различие двух смежных участков детали, имеющих небольшой яркостный контраст, возникающий лишь за счет условий тенеобразования.

Ахроматическая адиспаропия зависит как от уровня контрастной чувствительности, так и от состояния глазо-двигательных мышц. Оба эти показателя весьма чувствительны к освещению, а также количеству и качеству зрительной

нагрузки работающего, что обуславливает возможность использования динамики времени ахроматической адиспаропии для оценки ЗУ. Этот метод успешно использовался для относительной оценки ЗУ, в том числе при обосновании норм искусственного освещения и исследованиях, относящихся к практическим вопросам гигиены и физиологии труда [14].

При всестороннем подходе к исследованию влияния на человека световой среды, формируемой искусственным освещением, необходимо использование метода экспертных оценок, в частности субъективной оценки условий освещения. Психологическое воздействие света определяет общую среду и, соответственно, субъективное впечатление. Субъективная оценка помогает оценивать и обосновывать новые требования к качеству освещения. Существенным достоинством метода субъективного оценивания является его доступность.

Любая экспертная оценка сводится к приписыванию некоторому признаку предмета (или системы предметов) того или иного ранга. Такое приписывание (оценка) имеет интуитивный характер и основывается на субъективном суждении наблюдателя. По утверждению С. Геллерштейна, субъективные проявления есть не что иное, как отражение состояния объективных процессов в сознании или ощущениях самого человека [22].

Психологические методы исследования позволяют достаточно точно оценить потенциальные возможности организма человека в условиях реального производства. Даже в том случае, когда экспертной оценке подвергается какой-либо один признак, она имеет интегральный характер.

Субъективная оценка условий освещения при выполнении напряженных зрительных работ включает, как правило, не только количественную составляющую освещения (освещенность). Важна также качественная сторона, позволяющая, с одной стороны, успешно выполнить работу, а с другой стороны, удовлетворять психологическому и эстетическому восприятию окружающих предметов, находящихся в поле зрения человека.

На субъективную оценку световой среды влияют воспринимаемый цвет кожи лица и рук людей, а также цвет привычных для человека объектов, наблюдаемых при естественном цвете, например растений, а также ряд других. Следует учитывать то обстоятельство, что субъективная оценка качества освещения формируется при наблюдении тех объектов, суждение о цвете которых эксперт составляет под влиянием опыта, памяти.

### **1.3 Оценка фотобиологической эффективности осветительных установок со светодиодами**

Существует широкий разброс мнений по оптимальным условиям применения СД, а также по оценке воздействия их излучения на орган зрения и физиологическое состояние человека. Воздействие света на человеческий организм включает зрительное восприятие, психофизиологическое и эмоциональное состояние, а также возможные отдаленные последствия для физического здоровья человека в целом.

Известно, что с появлением первых, так называемых, белых СД, которые излучали бело-голубой свет, ученые-гигиенисты заговорили об их опасности вследствие излучения ими достаточно интенсивной синей составляющей в спектре.

В [16] рассматривался вопрос об опасности излучения в сине-голубом участке спектра 440 – 460 нм, характерном для современных СД. Такое излучение представляет повышенную опасность для глаз детей и подростков, так как их хрусталики вдвое прозрачнее в сине-голубой области, чем у взрослых людей. Авторы обращали внимание на пигмент липофусцин, который в указанной полосе генерирует свободные радикалы, отравляющие пигментный эпителий сетчатки. По мнению исследователей, фотохимическое повреждение сетчатки может развиваться в отдаленные сроки и вызывать постепенные необратимые нарушения зрения. Авторами сделан вывод, что из белых СД наименее опасными для зрения представляются СД с КЦТ не выше 4000 К, у которых уровень

излучения в сине-голубой части спектра не больше, чем в жёлто-оранжевой. Поэтому белые СД с КЦТ порядка 6500 К уже вызывают опасения.

Авторы [1] также считают, что СД с КЦТ 2700 – 3000 К опасений не вызывают, но освещение СД холодно-белой цветности ведёт к 5-кратному снижению содержания мелатонина в крови по сравнению, например, с освещением натриевыми лампами высокого давления (НЛВД). Поэтому было предложено ввести полный запрет на вечерне-ночное освещение ИС с заметной долей излучения с длинами волн короче 540 нм. Вместе с тем существуют другие данные, свидетельствующие о том, что важны не столько спектральные характеристики ИС, сколько длительность экспозиции и уровень освещенности. Утверждается, что при умеренных освещённостях час пребывания в условиях освещения СД ИС холодной цветности способствует снижению концентрации мелатонина в крови на 3 – 8 % (эффект меньше, чем от телевизионного просмотра хоккейного матча).

В [4] было установлено, что подавление секреции мелатонина почти линейно усиливается по мере роста КЦТ у всех исследованных ими типов ИС. Монохроматические ИС (НЛНД и «янтарный» СД) оказывают наименьшее влияние, тогда как имеющий наибольшую КЦТ (9584 К) СД – наибольшее. Интересно и то, что все люминесцентные лампы (ЛЛ) с маркировкой X30 (530, 830 или 930) оказывают на секрецию мелатонина меньшее влияние, чем галогенные лампы накаливания.

Еще одной проблемой, связанной со СД, является качество их цветопередачи и способы ее оценки. В [38] указывается, что одним из основных вопросов анализа воспринимаемого цвета является восприятие белого цвета. Отличия в восприятии цветных объектов при освещении их ИС белого цвета, имеющими широкополосный и узкополосный спектры (СД или светодиодный модуль RGB), приводят к проблеме достоверности методов оценки цветопередачи таких ИС.

Поэтому технический комитет ТС1-69 Международной комиссии по освещению (МКО) разрабатывает новую методику оценки цветопередачи СД ИС.

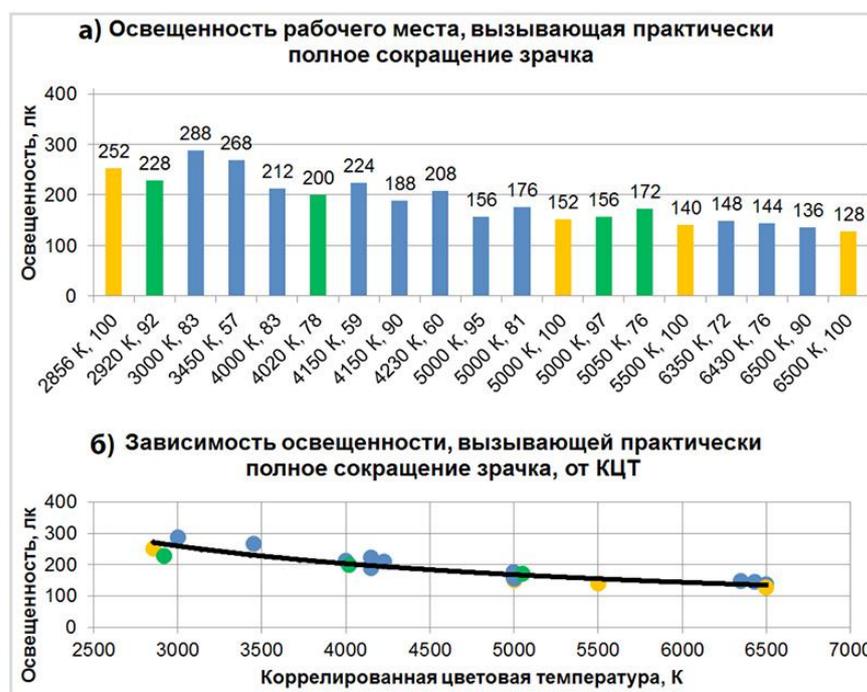
Однако по оценке ученых взаимное влияние цветности, цветопередачи и других характеристик спектра излучения ИС до сих пор изучены не полностью. При освещении СД могут возникать ситуации, когда оценки цветопередачи ИС по общему индексу цветопередачи  $R_a$  сильно отличаются от субъективных, что требует учитывать для создания оптимальных условий освещения не только фотометрические параметры, но и циркадные ритмы.

В настоящее время безопасное применение СД регламентируется общим стандартом IEC62471-2008 «Фотобиологическая безопасность ламп и ламповых систем» (в России действует его перевод – ГОСТ Р МЭК 62471-2013 [10]), в котором предусмотрены как методика испытаний, так и критерии, позволяющие определить, является ли ИС потенциально опасным. Согласно [10] полная безопасность применения гарантирована лишь для ИС с яркостью менее 104 кд/м<sup>2</sup>. Параметры современных высокоинтенсивных СД, используемых для освещения, могут во много раз превосходить этот уровень, что требует контроля характеристик ОП с ними и соответствующих рекомендаций по их безопасной эксплуатации.

Несмотря на большое количество опубликованных работ по возможной фотобиологической опасности освещения СД, исследователи часто приходят к противоречивым результатам, которые не позволяют сделать однозначный вывод. Например, некоторые ученые утверждают, что при светодиодном освещении белыми СД, которые имеют провал в спектре на 480 нм, происходит неадекватное управление диаметром зрачка глаза.

В [6] представлены расчеты, позволяющие определить, как тот или иной спектр излучения влияет на размер (диаметр) зрачка, и количественно сравнить степень влияния различных ИС. Расчеты проводились для случая, когда человек сидит за рабочим столом и смотрит на расположенные на нем документы.

Результаты приведены на рисунке 1а, где показано, какой уровень освещенности рабочего стола приводит к практически полному сокращению зрачка человека. Для удобства анализа результатов расчетов те же самые данные наложены на график для построения зависимости от КЦТ (рисунок 1б).



а – значения освещенности от разных ИС, вызывающие практически полное сокращение зрачка; желтый цвет – ЛН и дневной свет, зеленый – СД, синий – ЛЛ; б – те же значения в виде зависимости от КЦТ

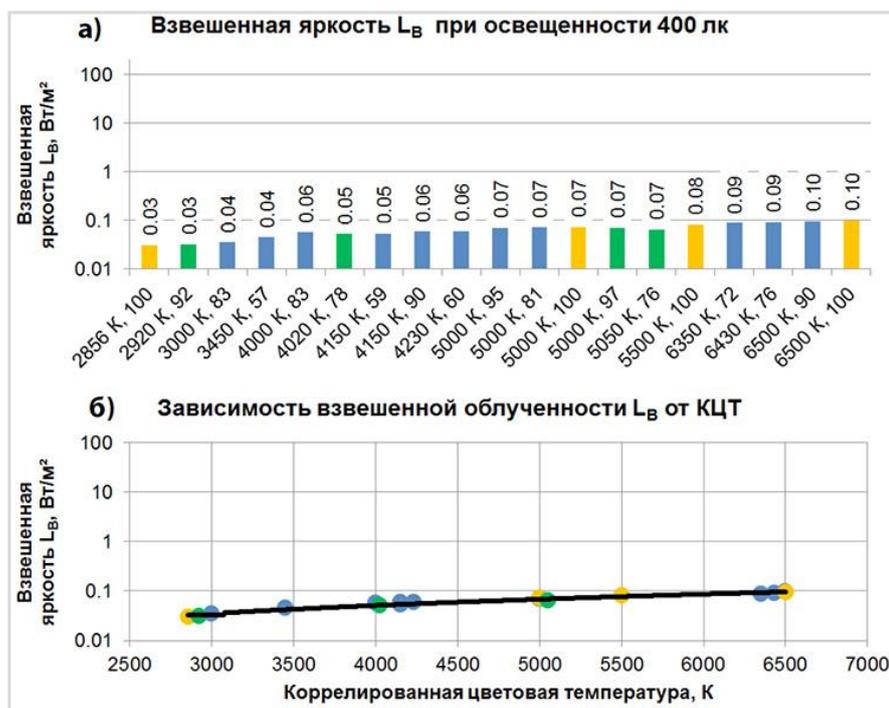
Рисунок 1 – Результаты расчета влияния уровня освещенности на размер зрачка

Опубликованные результаты показали, что, во-первых, для сокращения зрачка требуется большей интенсивности света с низкой КЦТ (2500 – 3000 К) и меньшей – с высокой КЦТ (5000 – 6000 К). Во-вторых, спектры СД и ЛЛ и дневной свет показывают одинаковое влияние на диаметр зрачка – никакого специфического действия излучения СД не наблюдается.

Это входит в противоречие с выводами, которые сделали авторы аналитического обзора [13], что «все светодиодные лампы должны частично расширять зрачок», и что «при повышении цветовой температуры светодиодной лампы средний диаметр зрачка также должен увеличиваться».

Используя спектральную весовую функцию опасности синего цвета [10], в [6] численно сравнили показатели опасности LB (так называемая взвешенная яркость синего света) от различных ИС. При этом рассматривался случай, когда

работник смотрит не на сам светильник, а, например, линия зрения направлена на рабочий стол. Из выполненных расчетов (рисунок 2а) авторы сделали вывод, что показатель  $L_B$  плавно увеличивает свое значение с ростом КЦТ. И при этом не наблюдалось каких-либо выбросов или провалов, которые бы свидетельствовали о негативном действии СД (рисунок 2б).



а – значения взвешенной яркости от разных ИС; б – те же значения в виде зависимости от КЦТ

Рисунок 2 – Результаты расчета взвешенной энергетической яркости синего света

Но есть и иная точка зрения. Авторы [13] делают противоположный вывод: «при освещении СД первого поколения имеется избыточная доза синего света относительно спектра солнечного света той же цветовой температуры при одинаковых уровнях освещенности». При этом авторы аргументируют свою точку зрения не расчетами и конкретными исследованиями, а путем сравнения между собой «высоты пика на отдельной длине волны», хотя оценку воздейст-

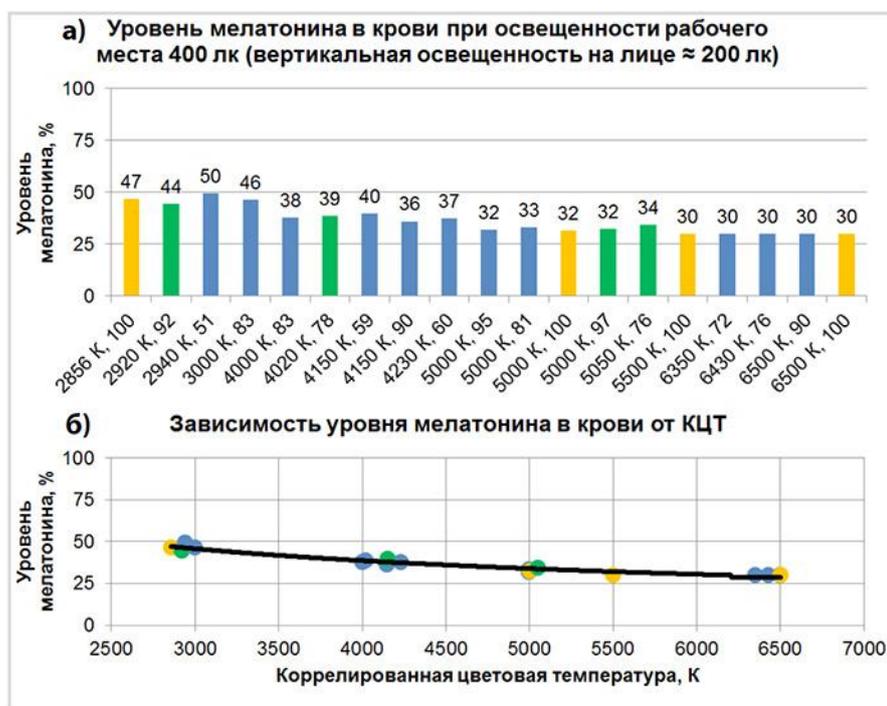
вия излучения необходимо делать интегрально, с помощью интеграла приведенного в [10]. Именно интегральный расчет позволяет получить численную оценку воздействия всего спектра излучения, что невозможно сделать при сравнении только спектральных интенсивностей одной длины волны. В [5] также утверждается, что степень воздействия на циркадную систему и опасность синего света определяются не амплитудой узкого пика, а общей долей потока излучения во всём сине-голубом спектральном диапазоне.

С помощью полученных зависимостей концентрации мелатонина в крови человека от длины волны излучения и от интенсивности излучения в [6] проведены расчеты, которые позволяют сравнивать между собой спектры разных ИС по степени влияния на синтез мелатонина (рисунок 3). Из полученных результатов авторы сделали вывод, что излучение с более высокой КЦТ сильнее подавляет синтез мелатонина, чем излучение с меньшей КЦТ (при равной освещенности). Авторы также отмечают, что разница между СД и другими ИС не наблюдается. Несмотря на отсутствие данных, которые бы говорили о том, что СД сильнее подавляют синтез мелатонина по сравнению с другими ИС с той же КЦТ, авторы [13] заключают, что: «светодиодные лампы содержат высокий уровень синего цвета в спектре, который при включении в вечерние часы препятствует выработке мелатонина». Следует добавить, что выработка мелатонина определяется не только КЦТ излучения, но и уровнем освещенности (яркости), который зачастую не учитывается.

Авторы [5] также установили, что СД и ЛЛ, а также естественный свет имеют биологическое действие, не имеющее значимых различий при одинаковой КЦТ.

Для снижения возможной фотобиологической опасности были разработаны белые СД второго поколения [19], близкие по своему спектру к солнечному свету. В спектре белого света СД второго поколения устранен провал излучения на 480 нм и отсутствует избыточная доза синего излучения. Поэтому можно предположить, что СД второго поколения не будут так опасны для органа

зрения, как считают некоторые специалисты. Однако для подтверждения этого предположения необходимы экспериментальные исследования.



а – значения концентрации мелатонина при освещении различными ИС; б – те же значения в виде зависимости от КЦТ

Рисунок 3 – Результаты расчета влияния освещения на подавление секреции мелатонина

Ниже представлены работы о проведенных исследованиях оценки условий освещения, создаваемых СД ИС первого поколения.

В [7] было проведено исследование влияния СД ИС (в качестве основного освещения) на орган зрения, физиологические, психофизиологические и психологические показатели у специалистов операторского профиля, работающих круглосуточно посменно (сутки через трое) в течение года в помещениях без естественного освещения.

В исследовании принимали участие 18 волонтеров: операторы сенсорного профиля, практически здоровые лица мужского пола в возрасте 22 – 45

лет, профессиональная деятельность которых проходит в условиях 24-часовой смены в специально оборудованных помещениях. На первом этапе (май 2015 г.) все участники эксперимента были комплексно обследованы по тестируемым показателям (орган зрения, физиологические, психофизиологические и психологические) при выполнении профессиональной деятельности в существующих условиях искусственного освещения, создаваемого ЛЛ (фоновые показатели). Исследуемые характеристики регистрировались до начала смены и после ее окончания. Для решения поставленной задачи в помещениях объекта были установлены светодиодные светильники СЭБМ-СД-1-1 производства АО «ЭлектроРадиоАвтоматика», удовлетворяющие требованиям государственных стандартов, норм пожарной безопасности, а также соответствующих европейским норм по электромагнитной совместимости. Осуществлялся гигиенический контроль показателей искусственного освещения, создаваемых СД ИС, на соответствие нормативным требованиям, прописанным в нормативно-технической документации для объектов подобного типа. КЦТ светодиодного светильника равна 2900 К. Динамическое обследование волонтеров проводилось на 1, 3, 6, 9 и 12 месяцах пребывания под светодиодным освещением по стандартным методикам до начала смены и после ее окончания. Наиболее сложные аппаратные методики офтальмологического обследования (компьютерная периметрия, оптическая когерентная томография сетчатки глаза) выполнялись после окончания смены непосредственно в клинике офтальмологии Военно-медицинской академии имени С. М. Кирова (ВМедА). В ходе обследования контролировались следующие показатели:

- офтальмологические: острота зрения (для дали), контрастная чувствительность, рефракция, цветоощущение, функциональная активность первого и второго нейронов сетчатки, морфологические параметры сетчатки и нервных волокон в макулярной зоне;

- физиологические: ЧСС, систолическое артериальное давление крови, диастолическое артериальное давление крови, показатели электрокардиографии;

– психофизиологические: определение реакции на движущийся объект, определение времени простой зрительно-моторной реакции, определение инкрементного порога КЧСМ;

– психологические: показатели субъективной оценки самочувствия, активности и настроения по методике САН, показатели теста Спилбергера-Ханина, показатели анкеты самооценки состояния АСС.

Выявленная статистическая значимость различий между количеством случаев ухудшения и случаев стабильности либо улучшения показателя остроты зрения ( $p < 0,05$ ) свидетельствовала о том, что наблюдаемая динамика отражала процесс адаптации органа зрения к новому виду освещения рабочих мест. Кроме того, после завершения смены у волонтеров систематически наблюдался сдвиг в сторону увеличения показателей контрастной чувствительности глаз на частотах 1 цикл/град и 2 цикл/град в условиях светодиодного освещения.

В целом, эти изменения указывали на лучшую функциональную адаптацию органа зрения к зрительной нагрузке в условиях СД ИС. Принимая во внимание тот факт, что в течение двенадцати месяцев основные условия экспериментального исследования не подвергались изменению (режим суточных смен не менялся, волонтеры до заступления на суточную смену по-прежнему находились в обстановке комбинированного освещения, включая естественное), можно утверждать, что представленные выше изменения носили закономерный характер и отражали формирующуюся тенденцию.

Полученные результаты исследования давали основание предполагать, что фактором, способным оказывать влияние на функциональные изменения показателей органа зрения, являлся коэффициент пульсации светового потока, значения которого существенно различаются у двух сравниваемых в исследовании ИС. Коэффициент пульсации светового потока ЛЛ составлял 10 – 15 %. СД ИС, используемые в эксперименте и создающие световую среду в помещениях без естественного освещения, имеют коэффициент пульсации 0 – 0,02 %. Таким образом, в условиях световой среды, созданной как ЛЛ, так и СД ИС были отмечены изменения тех показателей, которые отражают функциональное

состояние органа зрения и связаны с длительной зрительно-напряженной работой. При суточной работе в условиях освещения СД отмечалось статистически значимое улучшение функциональных показателей органа зрения, что указывало на снижение явлений дезадаптации после длительной зрительно-напряженной работы по сравнению с аналогичной работой в условиях освещения ЛЛ.

Наблюдение за состоянием органа зрения волонтеров, осуществляющих в течение 12 месяцев суточную зрительно-напряженную работу при СД ИС с КЦТ 2900 К, не выявило таких изменений, как фотохимическое повреждение сетчатки синим светом.

Сравнительный анализ результатов исследования физиологических показателей и функционального состояния ЦНС волонтеров до и после окончания суточной смены, как при освещении рабочих помещений СД ИС, так ЛЛ, существенных различий не выявил. То есть освещение рабочих помещений СД ИС в течение 12 месяцев не привело к изменениям физиологических показателей и функционального состояния ЦНС.

Сравнительный анализ контролируемых психологических показателей до и после суточной сменой у волонтеров через 12 месяцев периодического воздействия СД и первоначальных их фоновых значений, зафиксированных в мае 2015 г., не выявил статистически значимых различий. На 12 месяце экспериментального исследования проведенное психологическое тестирование показало положительное оценочное восприятие всеми без исключения волонтерами мероприятий по замене ИС на СД. При освещении рабочих помещений объекта СД выполнение профессиональной деятельности в течение 24-х часов не вызывало чувства дискомфорта и выраженного снижения показателей субъективной оценки функционального состояния волонтеров дежурных смен.

На основании результатов исследования, был сделан вывод, что через 12 месяцев наблюдения значимых изменений показателей состояния органа зрения, изменений самочувствия и функционального состояния организма у специалистов операторского профиля, работающих круглосуточно посменно при свето-

диодном освещении в помещениях без естественного освещения, выявлено не было.

Всесторонняя оценка условий освещения, создаваемых СД ИС первого поколения была осуществлена в [2]. Для экспериментальной ОУ были выбраны светильники со СД типа Cap Flat 66-16 совместного российско-корейского предприятия ООО «НЕПЕС РУС» и типа ДВО 12-38-001 Prizma ОАО «Арда-товский светотехнический завод» – и светильники с ЛЛ – типа ЛВО 04-4×14-041 PRS. Значения КЦТ излучения светильников – 3000, 4000 и 5000 К.

Изменение освещенности рабочей поверхности достигалось использованием регулируемых ПРА и драйверов (по протоколу DALI). Исследования проводились при трех уровнях освещенности: 200, 400 и 1000 лк.

В проведении исследований использовалась разработанная авторами комплексная методика оценки влияния условий освещения СД на показатели состояния органа зрения и организма человека в целом.

Во всех исследованных вариантах освещения качественные показатели освещения не превышали нормируемых значений: объединенный показатель *UGR* находился в диапазоне 10 – 14, коэффициент пульсации освещенности – 0,2 – 0,6 %.

План эксперимента предусматривал при заданных условиях освещения измерения до и после выполнения зрительных работ объема абсолютной аккомодации, времени ахроматической адиспаропии, КЧСМ (на КПФК-99 «Психомат»), контроль артериального давления. В конце работы наблюдатели заполняли анкеты субъективной оценки условий освещения. Кроме того, до начала выполнения зрительно-напряженной работы и после ее окончания у волонтеров измерялись монокулярно пороги цветоразличения с помощью аномалоскопа АН-59 и проекции слепого пятна органа зрения (по методу кампиметрии).

Исследования объема абсолютной аккомодации (ОАА) показали, что при выполнении напряженной зрительной работы во всех рассматриваемых вариантах освещения его значения уменьшаются. Определение достоверности изменения ОАА в результате зрительной нагрузки по *t*-критерию Стьюдента с  $p <$

0,05 позволило констатировать, что практически во всех вариантах освещения обнаружены достоверные сдвиги в значениях ОАА, не превышающие в то же время границ естественных вариаций этого показателя аккомодативной функции органа зрения (0,5 – 1,5 дптр).

Наибольшие значения ОАА зафиксированы при освещении СД. Превышение ОАА после работы при освещении СД по сравнению с базовым вариантом освещения при КЦТ 4000 К в диапазоне освещенности 200 – 1000 лк составило 0,6 – 0,7 дптр (6,3 – 8,4 %), при КЦТ 5000 К в диапазоне освещенности 200 – 400 лк составило 0,5 – 0,7 дптр (6,0 – 8,0 %). То есть установлено, что орган зрения лучше аккомодирует при освещении СД (при КЦТ 4000 и 5000 К). Это объясняется большей активностью цилиарной мышцы и связано, видимо, со спектром излучения СД.

Влияние КЦТ излучения при постоянном уровне освещенности на изменение времени ахроматической адиспаропии в процессе работы в сравниваемых вариантах характеризовалось высокой степенью существенности. Время ахроматической адиспаропии как до работы, так и после ее выполнения оказалось более продолжительным при освещении СД. Это свидетельствует о том, что освещение СД создает благоприятные условия для работы аккомодационно-мышечного аппарата органа зрения.

При оценке состояния сетчатки по показателям компьютерной томографии было установлено, что в контрольной и основной группах после окончания эксперимента у волонтеров сохранен профиль фовеолы, не нарушена архитектура сетчатки. Статистическая обработка результатов обследования в обеих группах не выявила статистически значимых различий между исследуемыми показателями ( $p > 0,05$  по  $t$ -критерию Стьюдента). То есть состояние сетчатки волонтеров остается без достоверных изменений.

Исследование площади проекции слепого пятна показало, что ретинальное утомление, оцененное по состоянию периферического зрения, приводит к достоверному увеличению физиологической площади слепого пятна после выполнения напряженной зрительной работы. Диапазон увеличения проекции

диска зрительного нерва по отношению к исходному для вариантов освещения ЛЛ составил  $6,57 \div 12,06$  %; для вариантов освещения СД –  $3,87 \div 10,77$  %. Сопоставление динамики исследуемого показателя выявило, что при КЦТ 3000 К освещение СД способствует меньшему ЗУ по сравнению с ЛЛ ( $p < 0,05$ ).

Исследования состояния центрального звена органа зрения до и после работы по методу КЧСМ не позволили выявить наиболее предпочтительный вариант освещения:  $t$ -критерий Стьюдента не подтвердил достоверности различий во всем исследованном диапазоне освещенности и КЦТ. Таким образом, установлено, что показатели КЧСМ при освещении СД и ЛЛ существенно не различаются.

Результаты исследований показывают, что снижение КЧСМ в ходе эксперимента связано с выполняемой зрительно-напряженной работой; этот процесс обратим – к началу следующего дня показатели восстанавливались до исходных значений. То есть освещение СД не оказывало угнетающего действия на состояние ЦНС.

ЗР оценивалась по методу корректурных проб. Для проводимых исследований были использованы специальные тесты – корректурные пробы, составленные из букв кириллицы с помощью генератора случайных чисел, контраст тестов – отрицательный. В течение двух минут наблюдатели работали с тестами – вычеркивали заданную букву, встречающуюся в определенных сочетаниях. По результатам теста рассчитывался коэффициент ЗР  $I$ , учитывающий просмотренное в тесте количество знаков, и коэффициент качества, учитывающий правильно вычеркнутые знаки и допущенные ошибки.

Анализ результатов исследования ЗР показал преимущества освещения СД с позиции обеспечения большей ЗР. Наибольшее значение коэффициента ЗР  $I$  при освещении СД установлено при КЦТ 4000 К. Так, по сравнению с ЛЛ при освещенности 200 лк он выше на 11,8 %; при освещенности 400 лк – на 14,9 %; при освещенности 1000 лк – на 12,4 %.

Парный коэффициент корреляции  $r$  подтвердил ( $p < 0,05$ ) наличие положительной взаимосвязи между ОАА и  $I$  после зрительной работы. Это позволи-

ло предположить, что определенный вклад в повышение коэффициента ЗР при освещении СД вносила лучшая работа аккомодационно-мышечного аппарата.

Результаты исследования качества работы показали, что в процессе зрительной нагрузки его показатель снижался. Однако достоверность снижения коэффициента точности по  $t$ -критерию Стьюдента обнаружена только в условиях освещения СД при КЦТ 4000 К (освещенность 400 и 1000 лк); при КЦТ 5000 К (освещенность 400 лк). Различия в качестве работы при сопоставлении вариантов освещения СД и ЛЛ оказались незначимыми.

ЗУ оценивалось по динамике временного порога ахроматической адиспепсии. Установлено, что при освещении СД в процессе полуторачасовой зрительно-напряженной работы развивалось меньшее ЗУ. Наименьшее ЗУ при освещении СД отмечено для КЦТ 4000 и 5000 К при освещенности 400 лк. Достоверность влияния КЦТ на ЗУ доказана во всех исследованных вариантах освещения с  $p < 0,05$  по  $t$ -критерию Стьюдента.

Анализ интегральных показателей эффективности освещения по ЗР показал, что условия освещения, создаваемые СД, способствовали обеспечению более высокой ЗР и меньшего ЗУ.

Анализ результатов экспериментальных исследований достоверно показал, что освещение СД не оказывает отрицательного (негативного) воздействия на орган зрения и показатели ЗР (возрастная группа волонтеров 20 – 25 лет). Исследования, выполненные при различных условиях освещения (СД и ЛЛ), выявили тесную связь функций зрения с компенсаторно-приспособительной реакцией организма и устойчивость адаптивных систем, ответственных за регуляцию чувствительности органа зрения и организма в целом.

В заключении авторы подчеркивают, что работы по гигиенической оценке освещения СД требуют продолжения, в том числе в направлении определения его эффективности для промышленных ОУ различного функционального назначения.

## **2 Разработка методов исследования эффективности освещения производственных помещений светодиодами**

Методы исследования – это приемы, процедуры и операции эмпирического и теоретического изучения различных явлений. С помощью методов получают достоверные сведения, используемые для построения научных теорий и выработки практических рекомендаций. Система методов исследования определяется исходной концепцией исследователя: его представлениями о сущности и структуре изучаемого объекта, общей методологической ориентации, целей и задач конкретного исследования.

Выделяют эмпирические и теоретические методы.

К эмпирическим методам исследования эффективности освещения светодиодами можно отнести описание, сравнение, измерение, анкетный опрос, тестирование, эксперимент, моделирование; к теоретическим – гипотетический (гипотетико-дедуктивный), абстрагирование, общелогические методы (анализ, синтез, индукцию, дедукцию, аналогию).

Для выбора методов на каждом этапе необходимо знать общие и конкретные возможности каждого метода, его место в системе исследовательских процедур. Задача исследователя состоит в том, чтобы для каждого этапа исследования определить оптимальный комплекс методов.

Для исследований эффективности освещения СД второго поколения нами выбраны эмпирические методы исследования, а именно описание, измерение, сравнение, эксперимент, анкетирование (метод экспертных оценок).

Описание – это фиксация признаков исследуемого объекта, которые устанавливаются, например, путем наблюдения или измерения. Описание бывает:

- непосредственным, когда исследователь непосредственно воспринимает и указывает признаки объекта;
- опосредованным, когда исследователь отмечает признаки объекта, которые воспринимались другими лицами.

Измерение – это определение численного значения некоторой величины путем сравнения ее с эталоном. Ценность этой процедуры в том, что она дает точные, количественные определенные сведения о предмете исследования. Это могут быть спектроколориметрические измерения светильников со светодиодами, измерения функциональных показателей органа зрения, организма человека в целом.

Сравнение – это сопоставление признаков, присущих двум или нескольким объектам, установление различия между ними или нахождение в них общего, осуществляемое как органами чувств, так и с помощью специальных устройств. Например, в настоящее время накоплено достаточно научных материалов об эффективности осветительных установок с ЛЛ, это может служить базой для сравнения с эффективностью освещения СД.

Эксперимент – это искусственное воспроизведение явления, процесса в заданных условиях, в ходе которого проверяется выдвигаемая гипотеза. Экспериментальные исследования – это основа для определения гигиенической эффективности ОУ различного функционального назначения.

Классифицируются эксперименты по различным основаниям:

- по отраслям научных исследований;
- по характеру взаимодействия средства исследования с объектом — обычные (экспериментальные средства непосредственно взаимодействуют с исследуемым объектом) и модельные (модель замещает объект исследования).

В основе анкетирования лежит заранее разработанный вопросник (анкета), а ответы респондентов (опрашиваемых) на все позиции вопросника составляют искомую эмпирическую информацию.

Качество эмпирической информации, получаемой в результате анкетирования, зависит от таких факторов, как формулировка вопросов анкеты, которые должны быть понятны опрашиваемому; квалификация, опыт, добросовестность, психологические особенности исследователей; ситуация и условия анкетирования; эмоциональное состояние опрашиваемых, а также – отношение к исследованию.

Метод экспертных оценок – это разновидность опроса, связанная с привлечением к оценке изучаемых явлений, процессов наиболее компетентных людей, мнения которых, дополняющие и перепроверяющие друг друга, позволяют достаточно объективно оценить исследуемое. Использование этого метода требует ряда условий. Прежде всего, это тщательный подбор экспертов – людей, хорошо знающих оцениваемую область, изучаемый объект и способных к объективной, непредвзятой оценке. Существенное значение имеет также выбор точной и удобной системы оценок и соответствующих шкал измерения, что упорядочивает суждения и дает возможность выразить их в определенных величинах.

Наиболее результативным методом исследования эффективности освещения СД второго поколения является эксперимент.

Эксперимент – это один из методов, обоснованный принципами повторяемости и доказательности. Стратегия эксперимента предполагает целенаправленно выстроенное наблюдение в нашем случае за влиянием освещения СД второго поколения на функциональные показатели органа зрения и организма человека в целом в заранее определенных условиях. Метод эксперимента отличается от исследовательского метода наблюдения активным взаимодействием с объектом изучения, возможностью изменения условий процесса, количественного соотношения параметров, а также включает в себя статистическую обработку данных. Возможность контролируемого изменения условий освещения СД второго поколения позволяет более глубоко изучить влияние освещения СД на орган зрения и организм человека в целом.

Для построения практического исследования необходимы изначальное формулирование изучаемой проблемы, постановка гипотез и последующая их проверка.

Проблема исследования, проводимого в рамках магистерской диссертации – отсутствие публикаций о влиянии освещения СД второго поколения на производительность зрительной работы, функциональное состояние работающих, выполняющих производственные зрительно-напряженные работы, а также

неоднозначное мнение исследователей о возможной опасности для органа зрения достаточно интенсивной синей составляющей в спектре белых СД.

Гипотеза исследования – это отсутствие вредного влияния освещения СД второго поколения на орган зрения и организм человека в целом при выполнении производственных зрительно-напряженных работ.

Результаты каждого эксперимента записываются в протоколе, где фиксируются общие сведения об испытуемых, дата и время эксперимента, количественные и качественные результаты эксперимента. Полученные данные обрабатывают, используя методы математической статистики, учитывающей особенности переменных и выборок испытуемых.

Все построение экспериментальных условий сводится к определению взаимодействия переменных: зависимой, независимой и побочных. Под независимой переменной понимается то условие или явление, которое может варьировать или изменять экспериментатор (выбранное время суток, уровень освещенности, тип ИС, модель зрительной работы, методики эксперимента), чтобы проследить его дальнейшее влияние на зависимую переменную (количественные и качественные результаты показателей эксперимента), т.е. параметров другого явления. В ходе определения переменных важно обозначить и конкретизировать их так, чтобы они поддавались регистрации и анализу.

Методология эксперимента разрабатывается для эффективного проведения экспериментальных исследований. Она включает разработку программы эксперимента, оценку измерений, выбор средств проведения эксперимента, непосредственное его проведение, обработку и анализ полученных экспериментальных данных.

### 3 Разработка программы экспериментальных исследований эффективности освещения светодиодами

#### 3.1 Экспериментальная исследовательская установка

Для экспериментальных исследований по оценке эффективности освещения СД второго поколения была разработана и смонтирована экспериментальная исследовательская установка (ЭИУ) в лаборатории № 316 института электроники и светотехники ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарева». В помещении для исследований естественный свет не предусматривался. Коэффициенты отражения  $\rho$  ограждающих поверхностей потолка, стен и пола исследовательского помещения соответственно составляли 0,7; 0,5; 0,3; коэффициент отражения рабочей поверхности – 0,3. Ограждающие и рабочие поверхности помещений были диффузно-отражающими.

Вид и план помещения, в котором проводились лабораторные исследования, со смонтированной ЭИУ представлены на рисунках 4 и 5.

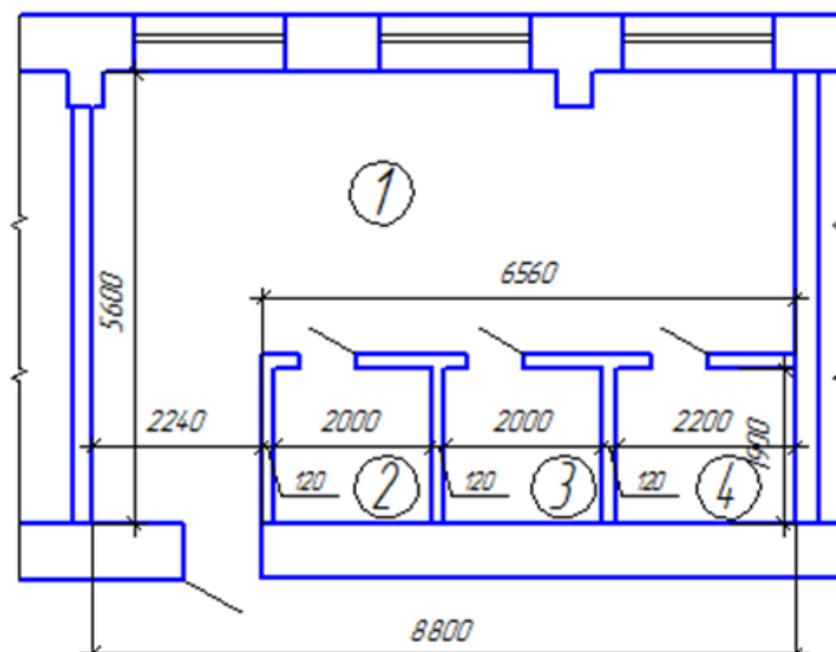


Рисунок 4 – План лаборатории № 316



Рисунок 5 – Экспериментальное помещение

В ЭИУ использовался опытно-экспериментальный светильник со СД второго поколения, изготовленный ОАО «Ардатовский светотехнический завод».

Выбранный уровень освещенности соответствовал требованиям нормативной документации для выполнения зрительных работ высокой точности с размерами объекта различения 0,3 – 0,5 мм. Для контроля освещенности рабочей поверхности использовался люксметр «ТКА-ЛЮКС» (ТУ-4437-005-16796024-2000). Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерения освещенности  $\pm 6\%$ .

Требуемый уровень освещенности рабочей поверхности достигался за счет регулировки высоты расположения светильника.

Опытно-экспериментальный светильник со СД второго поколения, который использовался для освещения экспериментального помещения, был промерен в ЦКП «Светотехническая метрология» ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва».

Были измерены и исследованы основные электрические, светотехнические и колориметрические параметры светильника:

- мощность и коэффициент мощности;
- световой поток;
- кривая силы света (КСС) в продольной и поперечной плоскостях;
- световая отдача;
- КЦТ;
- общий и специальный индексы цветопередачи.

Исследования проводились на современном научном оборудовании: светомерный шар (2м) – OL IS 7600 и спектрорадиометр – OL 770 VIS/NIR.

Основные результаты измерений электрических, светотехнических и колориметрических параметров светильника представлены в таблице 8. Спектр излучения и КСС исследуемого светильника представлены на рисунках 6 и 7.

Таблица 8 – Основные результаты измерений электрических, световых и колориметрических параметров исследуемого светильника

Тип светильника	Мощность, Вт	Коэффициент мощности	Световой поток, лм	КЦТ, К	Общий индекс цветопередачи	Световая отдача светильника с СД, лм/Вт
Опытно-экспериментальный светильник	42	0,98	3054,58	4132	97,55	75,21

Для участия в экспериментальных исследованиях была сформирована группа волонтеров в количестве 8 человек из числа студентов в возрасте 20 – 25 лет с нормальным зрением или с коррекцией остроты зрения до 1,0 и цветоощущением без патологии.

После проведения предварительных исследований (десятидневная тренировка по выбранным методикам) стабильные результаты показали 5 из 8 волонтеров, которые и были оставлены для участия в основном лабораторном эксперименте.

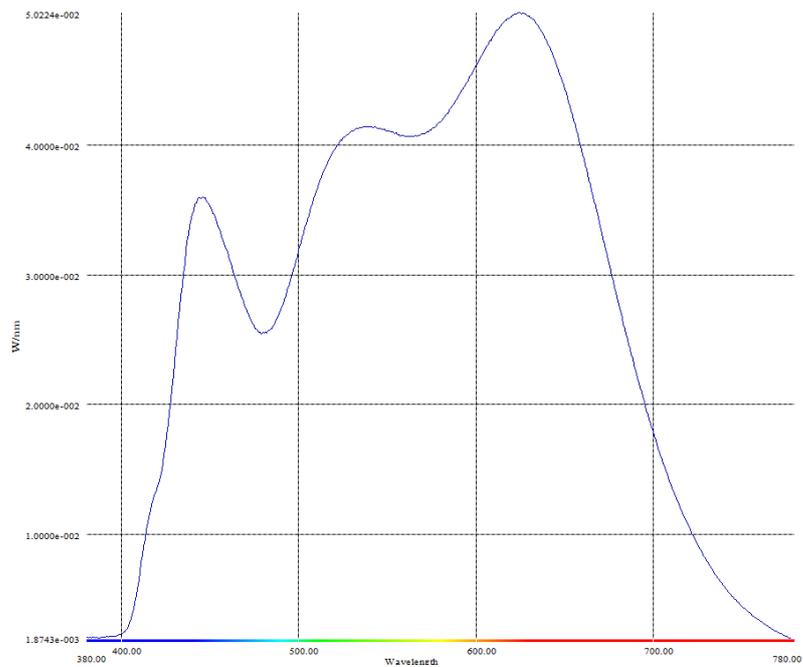


Рисунок 6 – Спектр излучения опытно-экспериментального светильника со СД второго поколения

**LUMINOUS INTENSITY DISTRIBUTION DIAGRAM**

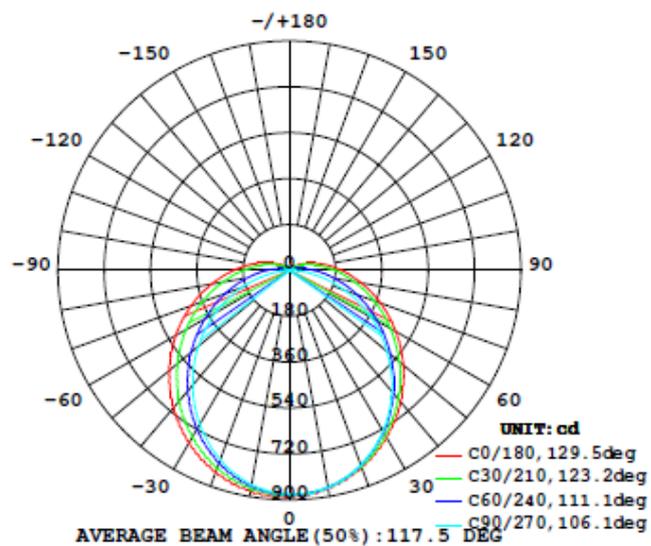


Рисунок 7 – КСС опытно-экспериментального светильника со СД второго поколения

### 3.2 Выбор модели зрительной работы

Зрительная работа в производственных условиях, как правило, связана с длительным выполнением операций, включающих зрительную и моторную компоненты.

При изучении ЗР в производственных условиях, для воспроизводимости эксперимента, необходимо определять не только параметры объекта различения, но и характеристики зрительной задачи: уровня ее разрешения (обнаружение, различение), доли чисто зрительной работы в ней, необходимости поиска объекта различения в пространстве и во времени. Это усложняет исходные условия эксперимента, и возникает проблема моделирования зрительно-напряженной работы.

Разработка таких лабораторных моделей началась в середине 60-х годов, когда появилась необходимость перехода от однократных измерений зрительных функций и показателей тестовых проб, характеризующих статическое состояние зрительного анализатора, к измерению его динамических характеристик. Большинство моделей зрительно-напряженных работ было реализовано с помощью буквенных или цифровых тестов, или карточек, выполненных на бумаге. Это ограничивало область применения полученных результатов, так как, строго говоря, такие модели могли считаться хорошей имитацией конторского труда и удовлетворительной имитацией лишь отдельных, частных видов производственной деятельности.

В большинстве случаев представляет интерес лабораторное изучение работ высокой, очень высокой и наивысшей точности, так как именно для них можно получить ощутимый эффект от улучшения условий освещения. Для таких работ используют специально построенные модели контрольно-браковочных или сборочных операций.

При построении моделей зрительно-напряженной работы учитывалось, что они должны удовлетворять следующие требования:

– на выбранных моделях работа должна носить характер продолжительной зрительно-напряженной деятельности, т. е. объем партий должен быть достаточным для обеспечения определенного длительного времени работы на этих моделях (от 1 до 2 – 3 ч), так как при точных зрительных работах наблюдается заметное расхождение в характере изменения ЗР в зависимости от освещенности для кратковременной и длительной работы;

– на предлагаемых моделях работа должна быть настолько сложной, чтобы ее абсолютно безошибочное выполнение в исследуемых осветительных условиях было невозможно, вместе с тем процент брака не должен быть слишком велик, чтобы не затруднить работу оператора;

– она должна быть «утомительной», т. е. в результате ее выполнения должно развиваться зрительно-моторное утомление, характеризующееся относительным изменением в процессе работы времени ахроматической адиспаропии.

Для проведения экспериментальных исследований в качестве модели зрительной работы была выбрана работа с металлическими и пластмассовыми заготовками, которая характерна для ряда технологических процессов в электроламповой промышленности.

Функциональная нагрузка заключалась в выявлении брака (царапин) на металлоизделиях – различной формы заготовок и на пластмассовых изделиях; рассортировке металлоизделий – трехзвенных токовых вводов, выполненных из различных металлов и сплавов.

Предварительно заготовки раскладывались на партии, и в них заранее были исключены фабричные дефекты, схожие с объектами различения. Число бракованных заготовок в каждой партии и общее число при их подсчете волонтеру не было известно заранее во избежание возможности пересчета и запоминания в процессе работы. Рассортировка и разбраковка каждой из составляющих модели производились непосредственно друг за другом без пауз. Ритм работы предусматривался свободным и устанавливался для себя каждым волонтером индивидуально, что имитировало производственные условия работника. Между тем инструкция, предназначенная каждому волонтеру, рекомендовала

выполнять работу качественно и наиболее быстро. Работа в течение 90 мин по выбранной модели эквивалента по ЗУ работе в реальных производственных условиях в течение рабочего дня.

Объекты различения выбирались в соответствии с разрядом зрительной работы [35] – Шв и Пв и по виду зрительной работы [11] – монтажные операции в электротехнической промышленности грубой, средней точности и сверхточные.

Модели зрительной работы представлены на рисунке 8.



Рисунок 8 – Металлические и пластмассовые заготовки – модели зрительной работы

### **3.3 Разработка методики проведения экспериментальных исследований**

Имеется достаточно работ показывающих, что напряженная деятельность в тех или иных условиях освещения приводит к ряду существенных сдвигов, как в нервной деятельности работающего человека, так и в состоянии его ана-

лизаторных систем [17, 20]. Таким образом, оправдано исследование эффективности освещения по тем или иным функциональным сдвигам в организме. Однако необходимо уточнить, какие из этих сдвигов наиболее адекватно отражают специфику возникающих изменений и в связи с этим, какие методы наиболее приемлемы для оценки развивающегося утомления при зрительной нагрузке в условиях освещения СД второго поколения.

Наиболее эффективным является принцип комплексного подхода к изучению физиологических функций, в этом случае результаты, полученные с помощью различных методик, дополняя друг друга, разносторонне отражают состояние органа зрения и организма в целом.

Учитывая то, что предполагается оценить характер воздействия освещения СД второго поколения на ЗУ и ЗР, необходимо использовать психофизиологические и физиологические методики и тесты, которые включают исследование зрительного анализатора, отдельные показатели ЦНС и функциональные показатели организма человека в целом.

Многолетние эксперименты показывают, что изучение взаимосвязей физиологических функций и физических факторов световой среды могут проводиться как в реальных производственных условиях, так и в лабораторных с моделированием заданных условий освещения. При этом особенностью методологического подхода к исследованиям должен быть их комплексный характер, который позволяет устанавливать наличие и степень выраженности отклонений изучаемых функций.

Анализ проблем утомления органа зрения в процессе зрительной работы и исследование критериев оценки состояния зрительных функций позволяют выбрать методологический подход к определению эффективности светодиодного освещения, базирующийся на оптимизации ЗР. Реализация такого подхода заключается в исследовании динамики показателей функционального состояния таких звеньев органа зрения, как аккомодационно-мышечный аппарат, рецепторный отдел и центральное звено. В рамках настоящего исследования нами

выбрана динамика показателя центрального звена органа зрения, а именно КЧСМ.

### 3.4 Статистическая обработка результатов эксперимента

Результаты экспериментальных исследований заносились в специальные протоколы. Статистическая обработка результатов измерения проводилась методом дисперсионного анализа:

– среднее арифметическое:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (9)$$

где  $\sum_{i=1}^n x_i$  – сумма всех вариантов ряда;

$n$  – объем выборки;

– дисперсия:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (10)$$

– среднеквадратичное отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}, \quad (11)$$

– доверительный интервал:

$$\bar{x} - t_{\alpha, n-1} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + t_{\alpha, n-1} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (12)$$

где  $t_{\alpha, n-1}$  – критическое значение  $t$ -статистики (распределение Стьюдента) с уровнем значимости  $\alpha$ , числом степеней свободы ( $n - 1$ ), которое определяется по специальным статистическим таблицам.

### 3.5 План экспериментальных исследований

План экспериментальных исследований включает оценку в динамике зрительных функций волонтеров, интегральных показателей ЗР, измерение диастолического и систолического артериального давления, ЧСС.

Зрительные функции предлагается оценивать по ОАА (монокулярно, измерением расстояния до ближайшей точки ясного видения), измерению времени ахроматической адиспаропии (бинокулярно).

Для оценки интегральных показателей ЗР предлагается использовать метод корректурных проб и измерение КЧСМ. Для этих исследований предназначен компьютерный комплекс для психофизиологических исследований «Психомат» КПФК-99.

План эксперимента предусматривает адаптацию волонтеров к исследуемым условиям освещения в течение 15 мин.

После зрительной нагрузки волонтеры должны заполнить анкету субъективной оценки, включающую вопросы, связанные с качеством освещения.

В таблице 9 представлен план проведения экспериментальных исследований.

Таблица 9 – План проведения экспериментальных исследований

Номер процедуры	Наименование процедуры	Примерное время на одну процедуру	Технические средства обследования
1	Измерение остроты зрения для дали монокулярно (оба глаза)	1 мин	Таблица Головина-Сивцева
2	Корректурная проба	2 мин	Прибор «Психомат»
3	Измерение критической частоты слияния световых мельканий	2 мин	Прибор «Психомат»

## Окончание таблицы 9

Номер процедуры	Наименование процедуры	Примерное время на одну процедуру	Технические средства обследования
4	Адаптация к исследуемым условиям освещения	до 15 мин	Экспериментально-исследовательская установка лаб. № 316
5	Измерение диастолического артериального давления, систолического артериального давления, частоты сердечных сокращений	2 мин	Тонометр Omron Мб Comfort (HEM-7000-E)
6	Измерение расстояния до ближайшей точки ясного видения (к определению объема абсолютной аккомодации)	2 мин	Таблица для исследования остроты зрения вблизи
7	Измерение времени ахроматической адиспаропии	0,5 мин	Тест-объект для измерения ахроматической адиспаропии
8	Зрительная нагрузка	90 мин	Работа с металлическими деталями, соответствующая разряду Шв
9	Заполнение анкет субъективной оценки	3 мин	Анкеты
10	Измерение объема абсолютной аккомодации	2 мин	Таблица для исследования остроты зрения вблизи
11	Измерение времени ахроматической адиспаропии	0,5 мин	Тест-объект для измерения ахроматической адиспаропии
12	Измерение диастолического артериального давления, систолического артериального давления, частоты сердечных сокращений	2 мин	Тонометр Omron Мб Comfort (HEM-7000-E)
13	Измерение критической частоты слияния световых мельканий	2 мин	Прибор «Психомат»
14	Корректурная проба	2 мин	Прибор «Психомат»

## 4 Экспериментальные исследования эффективности осветительных установок при выполнении зрительных работ производственного характера в лабораторных условиях

### 4.1 Исследования производительности зрительных работ

В таблице 10 представлены результаты расчета производительности зрительной работы, выполняемой в ходе экспериментальных исследований. Производительность зрительной работы определялась количеством разбракованных и рассортированных изделий в течение зрительно-напряженной работы.

Таблица 10 – Производительность зрительной работы при освещенности 300 лк

Наблюдатель	Сортировка металлоизделий (токовые вводы 3-х типов)				Время работы, мин	Производительность зрительной работы, шт/мин
	медь + платинит + никель, шт	никель + платинит + никель, шт	медь + платинит (широкий) + никель, шт	Общее количество, шт		
Наблюдатель №1	559,57	50,2	10,11	619,88	90	6,88
Наблюдатель №2	559,76	35,86	13,95	609,57		6,77
Наблюдатель №3	547,40	63,09	11,97	622,45		6,92
Наблюдатель №4	553,94	44,2	13,20	611,34		6,79
Наблюдатель №5	551,23	54,67	12,10	618,00		6,87

Во время проведения экспериментального исследования не было отмечено резкого снижения производительности зрительной работы.

В таблице 11 приведены результаты расчета производительности зрительной работы при трех уровнях освещенностях 300, 500 и 1000 лк при освещении СД второго поколения.

Таблица 11 – Производительность зрительной работы при разных уровнях освещенности

Показатели	Освещенность, лк		
	300 лк	500 лк	1000 лк
Среднее арифметическое величины, шт	6,85	7,14	6,14
Дисперсия, шт	0,18	0,50	0,15
Среднеквадратичное отклонение, шт	0,42	0,71	0,38
Доверительный интервал, шт	6,77 - 6,92	6,15 - 7,67	5,69 - 6,69
Достоверность различий по t-критерию Стьюдента	< 0,05	< 0,05	< 0,05

На основании полученных данных можно сделать вывод, что при освещенности 500 лк отмечается более высокая производительность зрительной работы.

#### 4.2 Исследования критической частоты слияния световых мельканий

КЧСМ – это минимальная частота мелькания прерывистого светового излучения в единицу времени, при которой глаз человека перестает различать мелькания, а ИС воспринимается им, как монотонное светлое пятно. Слияние мельканий при меньшей частоте импульсов свидетельствует об ухудшении функционального состояния коркового звена. КЧСМ является косвенным показателем лабильности зрительного анализатора и ЦНС в целом и зависит от различительной чувствительности глаза к быстро сменяющимся яркостям. Лабильность органа зрения (функциональная подвижность, т.е. способность проводить наибольшее количество волн возбуждения в единицу времени) повышается с улучшением как количественных, так и качественных характеристик освещения и снижается при ЗУ. Вследствие этого КЧСМ может служить мерой ЗУ коркового отдела зрительного анализатора и объективно характеризовать динамику ЗР. Показатель КЧСМ используется более часто, чем другие методы исследования, в связи с такими преимуществами, как простота методики, пор-

тативность аппаратуры, незначительные временные затраты и высокая информативность при определении утомляемости организма.

Исследования проводятся бинокулярно при фиксированной линии зрения с расстояния 1 м. Для получения достоверных результатов измерения повторяются трехкратно в двух направлениях: от наличия мельканий до их исчезновения и от сплошного видения до появления мельканий, после чего данные усредняются.

Измерение КЧСМ проводится при помощи комплекса для психофизиологических исследований КПФК-99М «ПСИХОМАТ».

Порядок проведения обследования следующий:

– испытуемый должен подтвердить уяснение смысла задания (рисунок 9), нажав щупом контактным стимульным (ЩКС) на кнопку “Готов” на пульте испытуемого (ПИ);

– наблюдать световой сигнал над центральной кнопкой ПИ. Если наблюдаются мелькания света, то нажать правую кнопку ПИ, если мельканий нет – то левую;

– выполнять задание до сигнала окончания теста.

Обследование заканчивается при достижении величины изменения периода 1 мс.

По окончании обследования выдается значение КЧСМ (рисунок 10), которое заносится в протокол.

Процедура проводится 3 раза (рисунок 11), усреднением полученных значений оценивается КЧСМ.

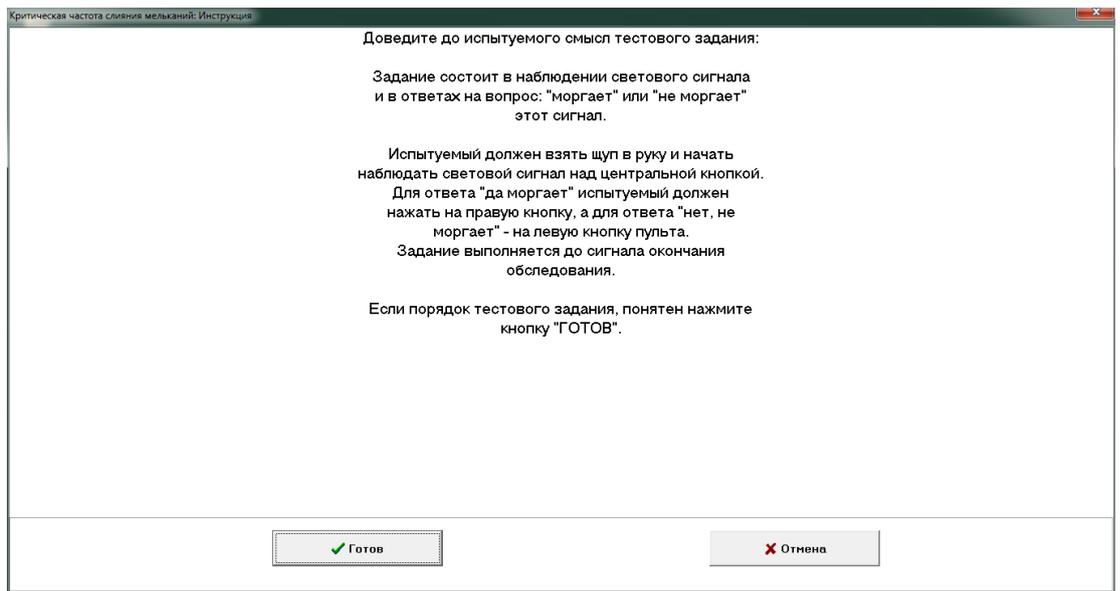


Рисунок 9 – Инструкция к измерению КЧСМ

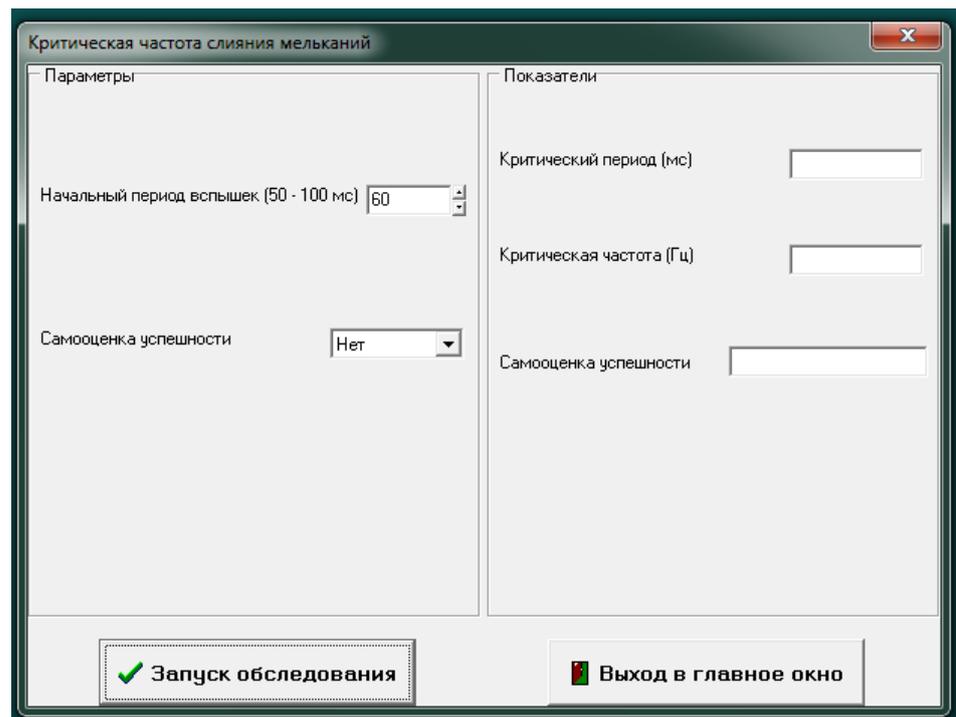


Рисунок 10 – Результаты измерения КЧСМ

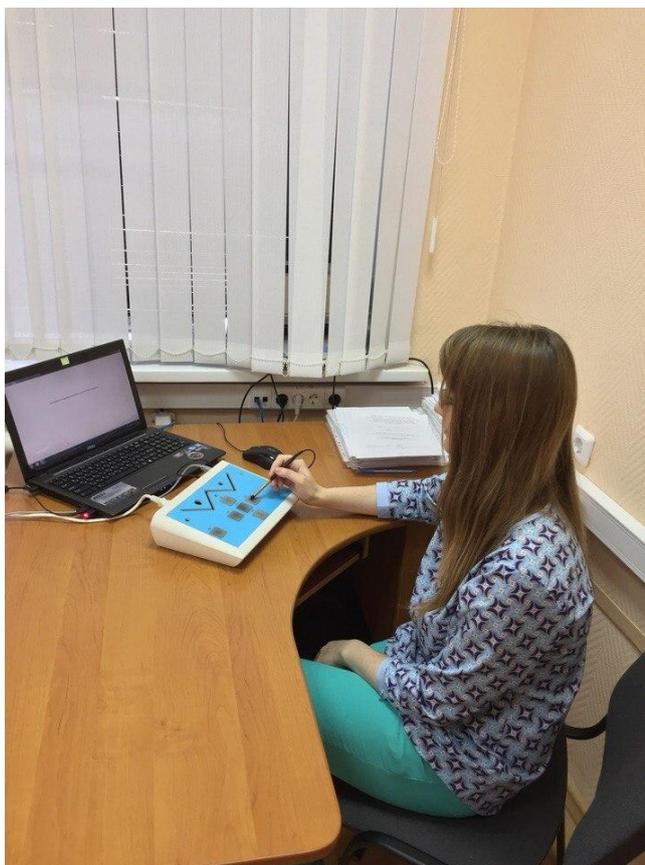


Рисунок 11 – Измерение КЧСМ на КПФК-99М «ПСИХОМАТ»

Результаты исследования КЧСМ при выполнении производственных зрительных задач приведены в таблице 12. С учетом незначительного разброса результатов измерения КЧСМ у каждого волонтера и между ними обработка данных производилась одновременно для всех испытуемых.

Полученные экспериментальные данные при варианте освещения СД второго поколения сравнивались с результатами исследований [15], где условия освещения создавались ЛЛ и СД первого поколения.

Таблица 12 – Динамика КЧСМ при освещении ЛЛ и СД при освещенности 300 лк

Показатели	До работы		После работы		
	ЛЛ и СД первого поколения	СД второго поколения	ЛЛ	СД первого поколения	СД второго поколения
Среднее арифметическое величины, Гц	42,46	42,36	39,35	40,92	41,55
Дисперсия, Гц	17,05	6,84	7,56	10,62	3,81
Среднеквадратичное отклонение, Гц	4,13	2,61	2,75	3,26	1,95
Доверительный интервал, Гц	38,22 - 45,46	42,09 - 42,64	36,94 - 41,76	38,07 - 43,77	41,35 - 41,76
Достоверность различий по t-критерию Стьюдента	–		< 0,05	< 0,05	< 0,05

При анализе данных таблицы 12 установлено, что после выполнения зрительно-напряженной работы при СД второго поколения происходит снижение численного значения КЧСМ в результате развития ЗУ. Это снижение составило 0,81 Гц (1,92 %). Достоверность различий КЧСМ до и после работы *t*-критерий Стьюдента подтвердил ( $p < 0,05$ ).

При сравнении результатов исследований при вариантах освещения, создаваемых различными ИС, установлено, что после выполнения зрительно-напряженной работы происходит достоверное ( $p < 0,05$ ) снижение численного значения КЧСМ, однако при СД второго поколения это снижение меньше. Представленные результаты показывают, что значения КЧСМ после зрительной нагрузки при освещении СД второго поколения выше, чем при освещении ЛЛ и СД первого поколения, что говорит о некотором его преимуществе с точки зрения создания условий для зрительной работы.

В таблицах 13 и 14 представлены результаты исследования КЧСМ, проведенные в разное время суток.

Таблица 13 – Динамика КЧСМ при освещенности 300 лк (дневное время)

Показатели	До работы		После работы	
	Критический период, мс	Критическая частота, Гц	Критический период, мс	Критическая частота, Гц
Среднее арифметическое величины	23,40	42,69	23,86	41,86
Дисперсия	2,40	9,24	1,46	4,49
Среднеквадратичное отклонение	1,55	3,04	1,21	2,12
Доверительный интервал	23,18 – 23,62	42,26–43,12	23,69 – 24,03	41,56 – 42,16
Достоверность различий по t-критерию Стьюдента	< 0,05			

Таблица 14 – Динамика КЧСМ при освещенности 300 лк (вечернее время)

Показатели	До работы		После работы	
	Критический период, мс	Критическая частота, Гц	Критический период, мс	Критическая частота, Гц
Среднее арифметическое величины	23,86	41,92	24,33	41,14
Дисперсия	1,11	3,30	0,99	2,63
Среднеквадратичное отклонение	1,05	1,82	0,99	1,62
Доверительный интервал	23,69 – 24,03	41,63– 42,22	24,17 – 24,50	40,88 – 41,41
Достоверность различий по t-критерию Стьюдента	< 0,05			

При анализе данных таблиц 13 и 14, установлено, что в вечернее время имеют место более низкие численные значения КЧСМ. То есть в вечернее время зрительная работа вызывает большее ЗУ, чем в дневное время, однако это можно объяснить наличием у студентов-волонтеров учебных занятий до экспериментальных исследований.

В таблице 15 приведены результаты исследования КЧСМ при трех уровнях освещенности: 300, 500 и 1000 лк при освещении СД второго поколения.

Таблица 15 – Динамика КЧСМ при освещенностях 300, 500 и 1000 лк

Показатели	Освещенность, лк					
	300 лк		500 лк		1000 лк	
	До работы	После работы	До работы	После работы	До работы	После работы
Среднее арифметическое величины, Гц	42,36	41,55	41,98	41,31	40,72	42,9
Дисперсия, Гц	6,84	3,81	25,50	13,47	28,73	70,06
Среднеквадратичное отклонение, Гц	2,61	1,95	5,05	3,67	5,36	8,37
Доверительный интервал, Гц	42,09 - 42,64	41,35 - 41,76	34,8 – 49,16	36,11 - 46,51	33,12 - 48,32	31 - 54,8
Достоверность различий по <i>t</i> -критерию Стьюдента	< 0,05				> 0,05	

При анализе данных таблицы 15 выявлено, что после выполнения зрительно-напряженной работы при СД второго поколения происходит уменьшение численного значения КЧСМ при освещенностях 300 и 500 лк, а при 1000 лк – увеличение. Однако при 1000 лк *t*-критерий Стьюдента не подтвердил достоверность различий КЧСМ до и после работы ( $p > 0,05$ ).

Исследования КЧСМ показывают, что в ходе выполнения зрительно-напряженной работы имеют место достоверные изменения ( $p < 0,05$ ), однако значения их не превышают границ физиологических колебаний этого показателя лабильности зрительного анализатора.

Результаты исследований КЧСМ позволяют сделать следующие выводы:

- снижение КЧСМ в процессе эксперимента связано с выполняемой зрительно-напряженной работой; этот процесс обратим – к началу следующего дня показатели восстанавливались до исходных значений;

- освещение СД второго поколения не оказывает угнетающего действия на состояние ЦНС.

### **4.3 Исследования зрительной работоспособности (метод корректурных проб)**

Метод корректурных проб дает возможность оценить темп психических процессов, уровень работоспособности и устойчивость к монотонной деятельности, требующей постоянного сосредоточения внимания, и проводится при помощи комплекса для психофизиологических исследований КПФК-99М «ПСИХОМАТ». Тестовое задание заключается в как можно более точном и быстром отыскании выбранных предварительно символов в таблице символов.

Порядок проведения обследования следующий:

- испытуемый должен подтвердить уяснение задания и запустить тест нажатием при помощи ЦКС на кнопку “Готов” ПИ;

- на видеомониторе (ВМ) выводится таблица с символами (20 × 20) (рисунок 12). В левом верхнем углу находится курсор, отмечающий текущий символ (А, В, С, Ж, Д). Если текущий символ задан параметром “ПЕРВЫЙ ТЕСТОВЫЙ СИМВОЛ” необходимо нажать левую кнопку ПИ. Чтобы пропустить символ надо нажать на центральную кнопку. После нажатия на кнопку курсор перейдет на следующий символ. Если параметр “ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ” равен “есть”, то пропущенные символы и символы, введенные неверно, выделяются красным цветом;

- далее тестовое задание выполняется абсолютно аналогично. По истечении промежутка времени, указанного в параметре “ВРЕМЯ ВЫПОЛНЕНИЯ”, выполнение тестового задания прекращается, а расчёт показателей производится на основании выполненной части задания;

- выполнять задание до сигнала окончания теста. По окончании обследования выдаются значения на ВМ, представленные на рисунке 13.

Полученные результаты заносятся в протокол (ПРИЛОЖЕНИЕ А).

Первый символ - левая кнопка  
 Второй символ - правая кнопка (если есть)  
 Пропустить - центральная кнопка  
 Завершить тест - Кнопка готов

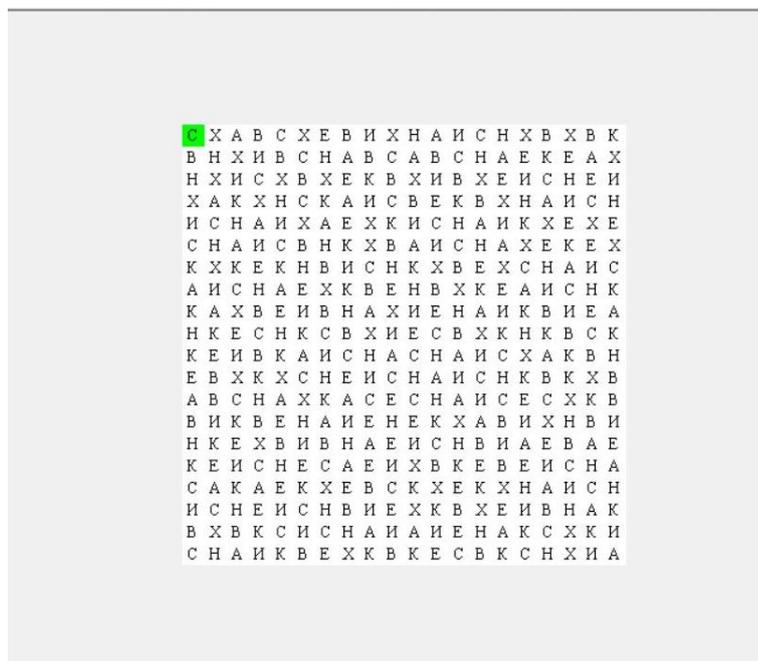


Рисунок 12 – Таблица с символами (20×20)

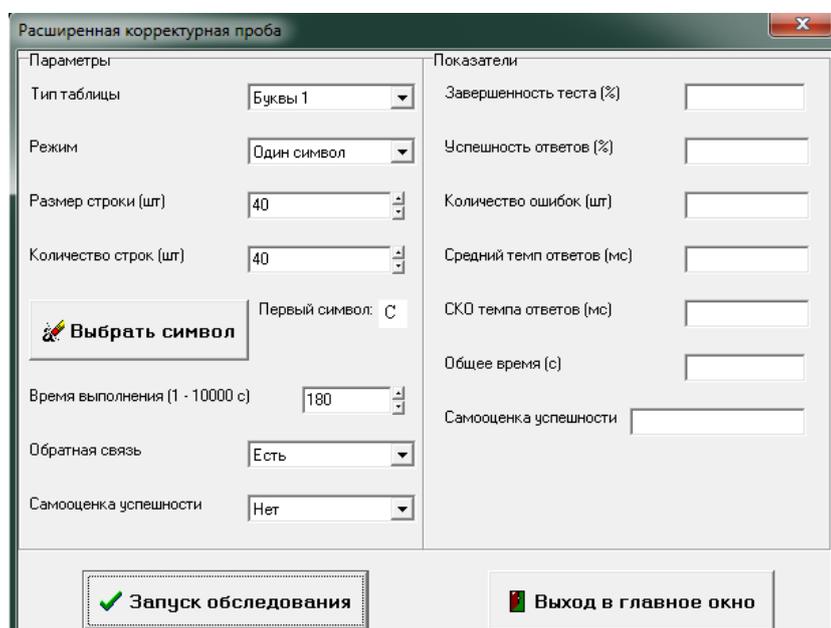


Рисунок 13 – Результаты выполнения корректурной пробы

Выполнение расширенной корректурной пробы показано на рисунке 14.

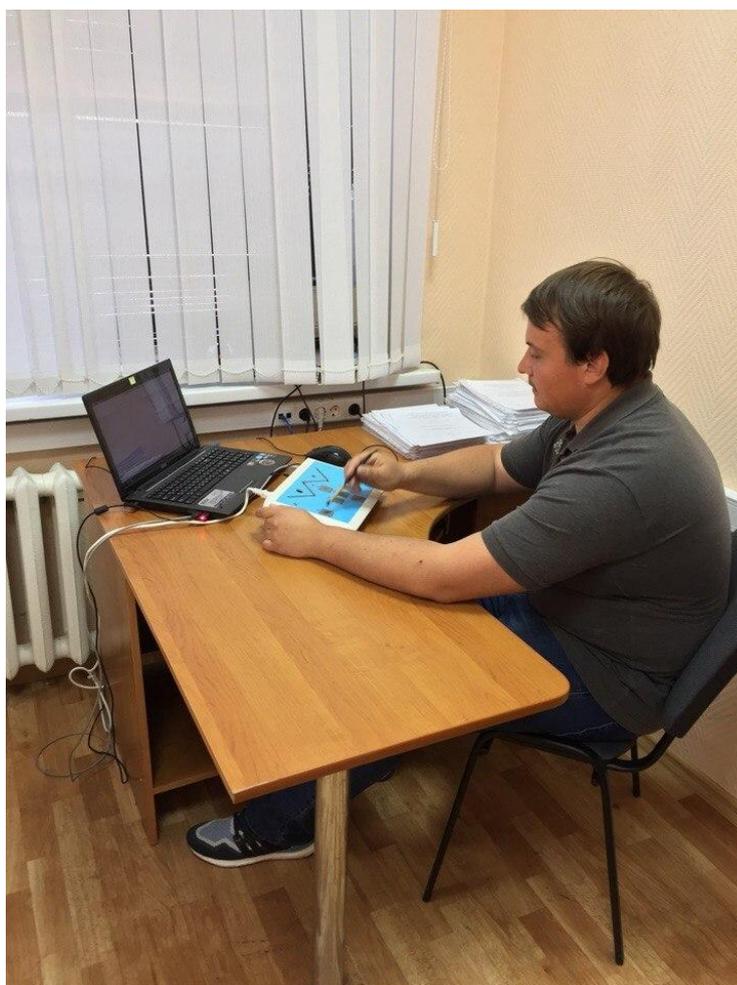


Рисунок 14 – Выполнение расширенной корректурной пробы

Результаты исследования по методике расширенной корректурной пробы представлены в таблицах 16 – 19.

Таблица 16 – Динамика показателей расширенной корректурной пробы при освещенности 300 лк (успешность ответов)

Показатели	До работы		После работы		
	ЛЛ и СД первого поколения	СД второго поколения	ЛЛ	СД первого поколения	СД второго поколения
Среднее арифметическое величины, %	98,5	99,09	98,33	97,77	98,61
Дисперсия, %	0,05	0,09	0,26	3,46	0,24
Среднеквадратичное отклонение, %	0,22	0,31	0,51	1,86	0,49

Окончание таблицы 16

Показатели	До работы		После работы		
	ЛЛ и СД первого поколения	СД второго поколения	ЛЛ	СД первого поколения	СД второго поколения
Доверительный интервал, %	98,31 - 98,66	99,03 - 99,14	97,88 - 98,78	96,14 - 99,39	98,52 - 98,70
Достоверность различий по t-критерию Стьюдента	–		< 0,05	< 0,05	< 0,05

При сравнении результатов, представленных в таблице 16, установлено, что после выполнения зрительной нагрузки успешность ответов уменьшилась при всех вариантах освещения, однако при освещении СД второго поколения были получены самые высокие показатели успешности.

Таблица 17 – Динамика показателей расширенной корректурной пробы при освещенности 300 лк (количество ошибок)

Показатели	До работы		После работы		
	ЛЛ и СД первого поколения	СД второго поколения	ЛЛ	СД первого поколения	СД второго поколения
Среднее арифметическое величины, шт	4,59	1,67	4,5	4,75	2,85
Дисперсия, шт	0,95	0,85	2,4	5,2	1,16
Среднеквадратичное отклонение, шт	0,97	0,92	1,55	2,28	1,08
Доверительный интервал, шт	3,69 - 5,4	1,50 - 1,84	3,14 - 5,85	2,56 - 6,56	2,65 - 3,05
Достоверность различий по t-критерию Стьюдента	–		< 0,05	< 0,05	< 0,05

Из таблицы 17 следует, что после проведения зрительной работы количество ошибок в расширенной корректурной пробе уменьшилось при освещении ЛЛ и увеличилось при обоих вариантах освещения СД, но при освещении СД второго поколения количество ошибок меньше.

Таблица 18 – Динамика показателей расширенной корректурной пробы при освещенности 300 лк (средний темп ответов)

Показатели	До работы		После работы		
	ЛЛ и СД первого поколения	СД второго поколения	ЛЛ	СД первого поколения	СД второго поколения
Среднее арифметическое величины, мс	240,29	233,05	225,79	244,32	236,10
Дисперсия, мс	462,06	391,96	297,19	216,71	453,18
Среднеквадратичное отклонение, мс	21,5	19,80	17,24	14,72	21,29
Доверительный интервал, мс	221,24 - 258,93	229,40 - 236,71	210,68 - 240,9	231,42 - 257,23	232,17 - 240,03
Достоверность различий по t-критерию Стьюдента	–		< 0,05	< 0,05	< 0,05

Исходя из полученных результатов (таблица 18), следует, что после выполнения зрительно-напряженной работы средний темп ответов при освещении ЛЛ уменьшился, а при освещении СД – увеличился, однако при СД второго поколения средний темп ответов ниже, чем при СД первого поколения.

Таблица 19 – Динамика показателей расширенной корректурной пробы при освещенности 300 лк (скорость выполнения пробы)

Показатели	До работы		После работы		
	ЛЛ и СД первого поколения	СД второго поколения	ЛЛ	СД первого поколения	СД второго поколения
Среднее арифметическое величины, знаков/с	4,2	4,34	4,29	5,44	4,28
Дисперсия, знаков/с	0,19	0,12	0,25	5,91	0,15
Среднеквадратичное отклонение, знаков/с	0,43	0,35	0,5	2,43	0,39
Доверительный интервал, знаков/с	3,82 - 4,58	4,28 - 4,41	3,84 - 4,72	3,51 - 7,77	4,21 - 4,35
Достоверность различий по t-критерию Стьюдента	–		< 0,05	< 0,05	< 0,05

Из сравнения данных таблицы 19 следует, что после зрительной нагрузки скорость выполнения при освещении ЛЛ и СД первого поколения увеличилась, а при освещении СД второго поколения – уменьшилась.

В таблицах 20 и 21 приведены результаты исследований расширенной корректурной пробы, проведенных в разное время суток.

Таблица 20 – Динамика показателей расширенной корректурной пробы при освещенности 300 лк (дневное время)

Показатели	Успешность ответов, %		Количество ошибок, шт		Средний темп ответов, мс		Скорость выполнения пробы, зн/сек	
	до	после	до	после	до	после	до	после
Среднее арифметическое величины	99,10	98,63	1,6	2,78	236,75	239,01	4,27	4,22
Дисперсия	0,10	0,24	0,81	1,14	448,75	445,51	0,12	0,14
Среднеквадратичное отклонение	0,31	0,49	0,90	1,07	21,18	21,11	0,35	0,38
Доверительный интервал	99,03 – 99,18	98,51 - 98,75	1,38 - 1,82	2,52 - 3,05	231,51-242,00	233,79 - 244,24	4,18 - 4,36	4,12 - 4,31
Достоверность различий по t-критерию Стьюдента	< 0,05		< 0,05		< 0,05		< 0,05	

Таблица 21 – Динамика показателей расширенной корректурной пробы при освещенности 300 лк (вечернее время)

Показатели	Успешность ответов, %		Количество ошибок, шт		Средний темп ответов, мс		Скорость выполнения пробы, зн/сек	
	до	после	до	после	до	после	до	после
Среднее арифметическое величины	99,06	98,58	1,76	2,94	228,24	232,32	4,43	4,37
Дисперсия	0,10	0,25	0,92	1,20	283,98	446,59	0,10	0,17
Среднеквадратичное отклонение	0,31	0,50	0,96	1,09	16,85	21,13	0,32	0,41
Доверительный интервал	99,00-99,12	98,44 - 98,72	1,49 - 2,03	2,63 - 3,25	223,45 - 233,03	226,31 - 238,32	4,34 - 4,52	4,25-4,49
Достоверность различий по t-критерию Стьюдента	< 0,05		< 0,05		< 0,05		< 0,05	

При анализе данных исследований, проведенных в разное время суток, было установлено, что после зрительной нагрузки в вечернее время успешность ответов по расширенной корректурной пробе ниже, а количество ошибок выше, чем в дневное время, несмотря на более высокие показатели скорости выполнения пробы и низкие – среднего темпа ответов. Это свидетельствует о более выраженном ЗУ и влиянии циркадных ритмов человека, однако это можно объяснить и наличием у студентов-волонтеров учебных занятий до экспериментальных исследований.

В таблицах 22 – 24 приведены результаты исследования показателей расширенной корректурной пробы при трех уровнях освещенности: 300, 500 и 1000 лк при освещении СД второго поколения.

Таблица 22 – Динамика показателей расширенной корректурной пробы при освещенностях 300, 500 и 1000 лк (успешность ответов)

Показатели	Освещенность, лк					
	300 лк		500 лк		1000 лк	
	До работы	После работы	До работы	После работы	До работы	После работы
Среднее арифметическое величины, %	99,09	98,61	98,95	98,53	99,03	98,78
Дисперсия, %	0,09	0,24	0,03	0,30	0,13	0,05
Среднеквадратичное отклонение, %	0,31	0,49	0,18	0,55	0,36	0,22
Доверительный интервал, %	99,03 - 99,14	98,52 - 98,70	98,71 - 99	97,78 - 99,2	98,62 - 99,6	98,5 - 99,1
Достоверность различий по t-критерию Стьюдента	< 0,05		< 0,05		< 0,05	

При сравнении результатов таблицы 22, установлено, что после выполнения зрительной нагрузки успешность ответов уменьшилась при всех уровнях

освещенности, однако самые высокие показатели успешности были получены при освещенности 1000 лк, а самые низкие – при освещенности 500 лк.

Таблица 23 – Динамика показателей расширенной корректурной пробы при освещенностях 300, 500 и 1000 лк (количество ошибок)

Показатели	Освещенность, лк					
	300 лк		500 лк		1000 лк	
	До работы	После работы	До работы	После работы	До работы	После работы
Среднее арифметическое величины, шт	1,67	2,85	1,91	3,11	1,86	2,89
Дисперсия, шт	0,85	1,16	0,13	3,10	0,56	0,58
Среднеквадратичное отклонение, шт	0,92	1,08	0,36	1,76	0,75	0,76
Доверительный интервал, шт	1,50 - 1,84	2,65 - 3,05	1,4 – 2,42	2,33 -3,89	0,79 – 2,93	1,81 – 3,97
Достоверность различий по t-критерию Стьюдента	< 0,05		< 0,05		< 0,05	

Из таблицы 23 следует, что после выполнения зрительной работы количество ошибок в расширенной корректурной пробе увеличилось при всех уровнях освещенности, но при освещенности 300 лк количество ошибок меньше.

Таблица 24 – Динамика показателей расширенной корректурной пробы при освещенностях 300, 500 и 1000 лк (средний темп ответов)

Показатели	Освещенность, лк					
	300 лк		500 лк		1000 лк	
	До работы	После работы	До работы	После работы	До работы	После работы
Среднее арифметическое величины, %	233,05	236,10	248,12	247,68	251,48	254,96
Дисперсия, %	391,96	453,18	12,48	33,88	77,07	207,47

#### Окончание таблицы 24

Показатели	Освещенность, лк					
	300 лк		500 лк		1000 лк	
	До работы	После работы	До работы	После работы	До работы	После работы
Среднеквадратичное отклонение, %	19,80	21,29	3,53	5,82	8,78	14,40
Доверительный интервал, %	229,40 - 236,71	232,17 - 240,03	243,2 - 249,9	242,4 - 257,3	238,8 - 262,4	236,6 - 275,3
Достоверность различий по t-критерию Стьюдента	< 0,05		< 0,05		< 0,05	

Исходя из полученных результатов (таблица 24), следует, что после выполнения зрительно-напряженной работы средний темп ответов при освещенности 500 лк уменьшился, а при освещенностях 300 и 1000 лк – увеличился, однако при освещенности 300 лк средний темп ответов ниже, чем при остальных вариантах.

Таким образом, сравнение показателей расширенной корректурной пробы, проведенных при трех уровнях освещенности, не позволило выявить преимущества какого-либо уровня освещенности.

Анализ представленных результатов по методике расширенной корректурной пробы дал возможность заключить, что изменения исследуемых показателей носят обратимый характер и восстанавливаются к началу следующего дня. Следовательно, условия освещения, создаваемые СД второго поколения, для производительности зрительных работ не хуже, чем при ЛЛ.

#### 4.4 Исследования условий освещения методом экспертных оценок

Характерной и специфической особенностью субъективного метода является использование анкет-вопросников и числовой шкалы «приемлемости».

Использование шкалы оценок позволяет подвергать анкеты статистической обработке.

Выбор критерия оценки и объектов исследования имеет большое значение, так как от него зависит, насколько правилен полученный результат. Критерием оценки качества световой среды являлось ощущение комфорта, субъективно воспринимаемое экспертами.

Обоснование выбора перспективных систем освещения, существенно расширяющих область применения современных высокоэффективных ИС, в том числе и светодиодных, требует уделить серьезное внимание выводам, полученным на основе анализа субъективных оценок световой среды, в связи с этим при разработке анкеты-вопросника необходимо направить внимание экспертов и на возможные способы подхода к выбору балла.

Субъективная оценка вариантов освещения проводится по специально разработанной анкете, охватывающей основные характеристики условий освещения, а также психоэмоциональное состояние волонтеров. Блок вопросов предусматривает оценку количественных и качественных параметров световой среды, а также оценку освещения в целом. Для ответов предлагается балльная и категорийная шкалы оценок.

Балльной шкалой оценок оценивались качество цветопередачи ИС и общая оценка условий освещения в ЭИУ. Нами использована пятибалльная шкала, включающая оценки:

- очень хорошо,
- хорошо,
- удовлетворительно,
- плохо,
- очень плохо.

Использование нечетной шкалы оценок позволяет экспертам давать оценку варианту освещения в два этапа. Первоначально необходимо исходить из условия "приемлемо" – "неприемлемо" – "безразлично" ("хорошо" – "плохо"

– "удовлетворительно"), а затем если, необходимо, уточнить: "хорошо" или "очень хорошо", либо "плохо" или "очень плохо".

Категорийной шкалой оценок оценивались достаточность освещенности для выполнения работы, пульсации, слепящее действие ОУ и неравномерность освещенности в рабочей зоне. Эта шкала включала следующие категории:

- сильно заметно,
- заметно,
- едва заметно,
- почти не заметно,
- совсем не заметно.

Заполнение анкет (ПРИЛОЖЕНИЕ Б) проводится волонтерами после зрительной работы в исследуемых условиях освещения.

При обработке материалов анкет необходимо учитывать, что анкеты, в которых психоэмоциональное состояние экспертов оценивалось как плохое или очень плохое, для субъективной оценки варианта световой среды использоваться не должны с целью исключения влияния иных факторов на результат.

В таблице 25 представлены результаты заполнения обработки анкет субъективной оценки при трех уровнях освещенности: 300, 500 и 1000 лк.

Таблица 25 – Результаты обработки анкет субъективной оценки при освещенностях 300, 500 и 1000 лк

Освещенность, лк	300 лк		500 лк		1000 лк	
1. Достаточность освещенности для выполнения работы						
Категорийные оценки	Достаточно	Вполне достаточно	Достаточно	Вполне достаточно	Достаточно	Вполне достаточно
	81,74%	18,26%	65%	35%	68%	32%
2. Качественные показатели освещения						
Показатели/Категорийные оценки	Почти не заметны	Совсем не заметны	Почти не заметны	Совсем не заметны	Почти не заметны	Совсем не заметны
Пульсации	50,43%	49,57%	55%	45%	50%	50%

Окончание таблицы 25

Освещенность, лк	300 лк		500 лк		1000 лк	
Показатели/Категорийные оценки	Почти не заметны	Совсем не заметны	Почти не заметны	Совсем не заметны	Почти не заметны	Совсем не заметны
Неравномерность освещенности в рабочей зоне	72,17%	27,83%	46%	54%	40%	60%
Показатели/Балльные оценки	Хорошо	Очень хорошо	Хорошо	Очень хорошо	Хорошо	Очень хорошо
Качество цветопередачи ИС	72,17%	27,83%	60%	40%	57%	43%
3. Оценка слепящего действия осветительной установки						
Категорийные оценки	Едва заметно	Не заметно	Едва заметно	Не заметно	Едва заметно	Не заметно
	64,35%	35,65%	72%	28%	63%	37%
4. Общая оценка условий освещения						
Балльные оценки	Хорошо	Очень хорошо	Хорошо	Очень хорошо	Хорошо	Очень хорошо
	66,96%	33,04%	68%	32%	59%	41%
5. Уступает ли освещение СД освещению ЛЛ?						
Освещенность	300 лк		500 лк		1000 лк	
Да	0%		0%		0%	
Нет	100%		100%		100%	
6. Предложения по организации освещения						
Предложения	Да	Нет	Да	Нет	Да	Нет
Увеличить освещенность	17%	83%	21%	79%	17%	83%
Уменьшить освещенность	0%	100%	10%	90%	7%	93%
Изменить цветопередачу	0%	100%	6%	94%	14%	86%
Ограничить слепящее действие	0%	100%	23%	77%	31%	69%
Изменить распределение освещенности	7%	93%	0%	100%	0%	100%
7. Можно ли длительно выполнять напряженную зрительную работу в данных условиях освещения?						
Да, можно	100%		100%		100%	
Нет, нельзя	0%		0%		0%	

Анализ анкет субъективной оценки условий освещения, создаваемых СД второго поколения, при освещенности 300 лк показал, что в большинстве случаев волонтеры отметили освещенность, как достаточную для выполнения зрительно-напряженной работы, оценили общую оценку условий освещения баллом «хорошо». Качественные показатели освещения были оценены следующим

образом: пульсации освещенности и неравномерность освещенности в рабочей зоне оценены категорией «почти незаметно»; слепящее действие – категорией «едва заметно»; качество цветопередачи ИС баллом «хорошо». Такие оценки объясняются низким значением коэффициента пульсации светового потока светильника в ЭИУ и его высоким индексом цветопередачи  $R_a$ .

На вопрос анкеты «уступает ли освещение СД второго поколения освещению ЛЛ» 100 % волонтеров дали ответ «нет». На вопрос «можно ли длительно выполнять напряженную зрительную работу в данных условиях освещения» все волонтеры, участвующие в экспериментальных исследованиях, дали положительный ответ.

Большинство волонтеров были удовлетворены условиями освещения, хотя незначительная часть их предложила увеличить освещенность и изменить распределение освещенности.

Сравнение результатов субъективной оценки условий освещения СД второго поколения, проведенных при трех уровнях освещенности, выявило, что большая часть оцениваемых показателей имела высокие оценки при освещенности 1000 лк, однако по организации освещения более предпочтительным для волонтеров оказался вариант с освещенностью 300 лк.

Таким образом, анализ субъективной оценки условий освещения, создаваемых СД второго поколения, позволил заключить, что освещение данными ИС создает благоприятные условия для зрительной работы.

Результаты проведенных исследований могут быть в дальнейшем использованы для разработки практических рекомендаций по применению систем освещения на основе СД второго поколения.

## 5 Разработка практических рекомендаций

Оценка эффективности ОУ со СД второго поколения для производственных помещений, проведенная по разработанному методу, основу которого составляют экспериментальные физиолого-гигиенические лабораторные исследования, показала отсутствие негативного действия на орган зрения и организм человека в целом. Имеющие место в ходе эксперимента изменения функциональных показателей органа зрения и состояния организма входят в соответствующие границы физиологических колебаний и имеют обратимый характер.

Полученные результаты экспериментальных исследований позволили сформулировать технические требования для устройства светодиодного освещения и разработать практические рекомендации по реализации освещения СД второго поколения в производственных помещениях различного функционального назначения, которые будут способствовать оптимизации условий труда при выполнении напряженных зрительных работ.

Разработанные рекомендации относятся к тем видам работ, которые выполнялись в лабораторном эксперименте или близким к ним по зрительным задачам – сборочные или контрольно-браковочные работы разрядов Шв [35].

При определении областей применения светильников со СД второго поколения подразумевалось, что выполняются все качественные показатели освещения.

Рекомендуемые области применения светильников со СД второго поколения приведены в таблице 26 [11].

Таблица 26 – Рекомендуемые области применения СД второго поколения для освещения производственных помещений

Наименование зрительной работы и вида деятельности	$E_{\text{экс}}$ , ЛК	$U_0$ , не менее	$UGR$ , не более	$R_a$ , не менее	$K_{\text{п}}$ , %, не более
Изготовление кабелей и проводов	300	0,60	25	80	20

Окончание таблицы 26

Наименование зрительной работы и вида деятельности	$E_{экс}$ , лк	$U_0$ , не менее	$UGR$ , не более	$R_a$ , не менее	$K_p$ , %, не более
Намотка на катушки: – большие	300	0,60	25	80	20
Пропитка катушек					
Монтажные операции: – грубые					
Работы грубой и средней точности при металлообработке: размер объекта различения > 0,1 мм					
Ручная обработка листов толщиной менее 5 мм					

Для создания установок искусственного освещения, безопасных для зрительной системы и общего состояния организма человека необходимо:

- провести измерения световых и цветовых характеристик светильников со СД второго поколения;

- на базе проведенных световых измерений создать *ies*-файлы для возможности моделирования вариантов освещения с помощью специализированных светотехнических программ;

- определить высоту подвеса светильников, обеспечивающую на рабочей поверхности нормируемую освещенность в соответствии с [35];

- выбрать оптимальную схему размещения светодиодных светильников, обеспечивающую регламентированную равномерность распределения освещенности по рабочей поверхности;

- методом моделирования ОУ или классическим инженерным методом определить (рассчитать) объединенный показатель дискомфорта  $UGR$ , который не должен превышать значений, представленных в таблице 26;

- обеспечить значение коэффициента пульсации освещенности не более 5 %. Отрицательное действие пульсации на организм человека достаточно мало только при глубине пульсации не более 5 – 6 %, стробоскопический эффект

может возникать (в производственных условиях) при глубине пульсации более 5 %;

– для выполнения требований стандартов, принятых Международной электротехнической комиссией CIE S009/IEC 62471, следует использовать СД светильники, имеющие значения КЦТ до 5000 К, что подтверждено результатами настоящих исследований.

При проектировании ОУ со СД второго поколения, безопасных для зрительной системы и общего состояния организма человека, выбор светильников должен осуществляться в соответствии с требованиями ГОСТ Р 54350-2015 [12]:

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

– в любой меридиональной плоскости – для круглосимметричных светильников;

– в главной продольной и поперечной плоскости – для симметричных и асимметричных светильников;

– габаритная яркость светильников со СД в зоне ограничения яркости 0 – 90° должна быть не более 5000 кд/м<sup>2</sup>;

– неравномерность распределения яркости по выходному отверстию СД светильников должна быть  $L_{\text{макс}} / L_{\text{мин}} \leq 5 : 1$ ;

– яркость используемых в светильниках СД не должна превышать 104 кд/м<sup>2</sup>, что гарантирует абсолютную безопасность их применения в соответствии с IEC62471-2008 [10].

Материалы исследований могут служить основой для внесения изменений в нормативные документы, определяющие требования к количественным и качественным показателям ОУ, выполняемых на основе светодиодных ИС второго поколения, имеющих благоприятное с гигиенических позиций спектральное распределение излучения. Предлагаемые изменения связаны с уточнением рекомендуемых значений КЦТ, объединенного показателя дискомфорта *UGR* и коэффициента пульсации освещенности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ научных публикаций показал, что имеют место различные подходы к оценке эффективности ОУ производственных помещений, среди которых можно выделить технико-экономические, психофизиологические и гигиенические.

В ходе работы над магистерской диссертацией разработан метод оценки эффективности ОУ со СД второго поколения, основанный на экспериментальном исследовании динамики функциональных показателей органа зрения и организма в целом при учете производительности зрительной работы.

В ходе выполнения магистерского исследования подтверждена эффективность разработанного метода оценки эффективности ОУ со СД второго поколения для производственных помещений. Разработанный метод оценки эффективности ОУ со СД позволил провести его апробацию в серии экспериментальных исследований по влиянию освещения СД второго поколения на орган зрения и организм человека в целом, на динамику ЗР и отдельные показатели функционального состояния организма.

На основании анализа результатов экспериментальных исследований достоверно установлено, что освещение СД второго поколения не вызывает отрицательного (негативного) действия на орган зрения и организм человека в целом. Имеющие место в ходе эксперимента изменения функциональных показателей органа зрения и состояния организма входят в соответствующие границы физиологических колебаний и имеют обратимый характер.

Во время проведения экспериментального исследования не было отмечено резкого снижения производительности зрительной работы.

По результатам исследований КЧСМ было установлено, что освещение СД второго поколения не оказывает угнетающего действия на состояние ЦНС.

По методу корректурных проб установлено, что условия освещения, создаваемые СД второго поколения, создают условия для производительности зрительных работ не хуже, чем при ЛЛ и СД первого поколения.

Анализ субъективной оценки условий освещения, создаваемых СД второго поколения, позволил заключить, что освещение данными ИС создает благоприятные условия для зрительной работы.

Результаты экспериментальных исследований позволили разработать практические рекомендации для ОУ со СД второго поколения, безопасных для зрительной системы и организма человека. Эти рекомендации связаны, в первую очередь, с учетом спектрального состава, слепящего действия и пульсации светового потока светильников со СД второго поколения.

Таким образом, задачи, поставленные в магистерской диссертации, выполнены полностью.

Значимость работы – получение экспериментального материала для нормативной базы освещения производственных помещений светодиодами второго поколения.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Аладов А. В. О биологическом эквиваленте излучения светодиодных и традиционных источников света с цветовой температурой 1800 – 10000 К / А. В. Аладов, А. Л. Закгейм, М. Н. Мизеров, А. Е. Черняков // Светотехника. – 2012. – № 3. – С. 7–10.

2 Амелькина С. А. Эффективность светодиодного освещения: монография / С. А. Амелькина, О. Е. Железникова, Л. В. Сеницына. – Саранск: Издатель Афанасьев В. С., 2014. – 200 с.

3 Берзинь В. И. Гигиеническое обоснование оптимальной освещенности в учебных помещениях вузов / В. И. Берзинь // Светотехника. – 1978. – № 1. – С. 17–19.

4 Бизяк Г. Спектры излучения и фотобиологическое действие светодиодов / Г. Бизяк, М. Кланичек-Гунде, М. Б. Кобав, К. Маловр-Ребек // Светотехника. – 2013. – № 2. – С. 20–23.

5 Блаттнер П. Световая среда для человека: наука, промышленность и закон / П. Блаттнер, К. Даниленко, П. Зак, Л. Текшева, А. Шаракшанэ // Светотехника. – 2016. – № 1. – С. 45–50.

6 Богданов А. А. Фотобиологическая безопасность светодиодов. Есть опасность или нет? / А. А. Богданов, Д. А. Николаев // Энергосовет. – 2016. – № 4 (46). – С. 35–42.

7 Болехан В. Н. Комплексное исследование влияния светодиодных источников света на функциональное состояние организма человека / В. Н. Болехан, В. П. Ганапольский, Н. А. Щукина, Л. В. Базылева // Медицина и здравоохранение: материалы V Междунар. науч. конф. (г. Казань, май 2017 г.). – Казань: Бук, 2017. – С. 85–89.

8 Гельтищева Г. А. Гигиеническая оценка работы студентов на видеотерминалах двух типов / Г. А. Гельтищева, Г. Н. Селехова // Гигиена и санитария. – 1992. – № 1. – С. 43–44.

9 Горшков С. И. Методики исследований в физиологии труда / С. И. Горшков, З. М. Золина, Ю. Е. Мойкин. – М.: Медицина. – 1974. – 312 с.

10 ГОСТ Р МЭК 62471-2013. Лампы и ламповые системы. Светобиологическая безопасность. – Введ. 2013-09-06. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2013. – 70с.: ил.

11 ГОСТ Р 55710-2013. Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерений. – Введ. 2014-07-01. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2014. – 19 с.: ил.

12 ГОСТ Р 54350-2015. Приборы осветительные. Светотехнические требования и методы испытаний. – Введ. 2015-05-06. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2015. – 30 с.: ил.

13 Дейнего В. Н. Профилактика глазных заболеваний: светобиологическая безопасность и гигиена энергосберегающих источников света / В. Н. Дейнего, В. А. Капцов, Л. И. Балашевич и др. // Глаз. – 2016. – № 1. – С. 18–33.

14 Еншина О. Д. О величине зрительного утомления в производственных условиях / О. Д. Еншина, М. А. Фаермарк // Светотехника. – 1981. – № 9. – С. 10–12.

15 Железникова О. Е. Оценка эффективности осветительных установок со светодиодами первого поколения / О. Е. Железникова, А. М. Кокинов, О. С. Войнова, С. Н. Агеев // Естественные и технические науки. 2018. № 7 (121). – С. 200–209.

16 Зак П. П. Потенциальная опасность освещения светодиодами для глаз детей и подростков / П. П. Зак, М. А. Островский // Светотехника. – 2012. – № 3. – С. 4–6.

17 Зоз Н. И. Физиолого-гигиеническая оценка некоторых напряженных зрительных работ: дис., канд. мед. наук / Н. И. Зоз. – М., 1987.

18 Ильянок В. А. Реакция зрительной коры мозга на распределение яркости в поле зрения / В. А. Ильянок, В. Г. Самсонова // Светотехника – 1971. – № 7. – С. 6–8.

19 Искусственное Солнце: Seoul Semiconductor представляет светодиоды нового поколения» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://zoom.cnews.ru/publication/item/58302>. – Загл. с экрана (Дата обращения: 08.06.2019).

20 Калашникова З. С. Особенности физиологических сдвигов при зрительно-напряженных работах: дис. канд. биол. наук / З. С. Калашникова. – М., 1987.

21 Кравков С. В. Глаз и его работа / С. В. Кравков. – М. – Л., 1950. – С. 377–428.

22 Леонова А. Б. Психодиагностика функциональных состояний человека / А. Б. Леонова – М.: 1984. – 165 с.

23 Методы определения показателей зрительной работоспособности (методические рекомендации). – М. :ВЦНИИОТ ВЦСПС. – 1986. – 12 с.

24 Мешков В. В. Осветительные установки / В. В. Мешков. – М. – Л., 1947. – 640 с.

25 Морозов В. И. Заболевание зрительного пути. Клиника. Диагностика. Лечение / В. И. Морозов, А. А. Яковлев. – М.: Изд. БИНОМ, 2010. – 680 с.

26 Нетудыхатная О. Ю. Роль КЧСМ в оценке напряженности труда моряков / О. Ю. Нетудыхатная // Офтальмологический журнал. – 1987. – № 5. – С. 300–303.

27 Окара О. И. О динамике световой среды операторских помещений / О. И. Окара // Светотехника. – 1978. – № 11. – С.12–14.

28 Постановление Правительства РФ №1356. Об утверждении требований к осветительным устройствам и электрическим лампам, используемым в цепях переменного тока в целях освещения. – Введ. 2017-11-10. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2017. – 22 с.

29 Практикум по физиологии труда / Под ред. К. С. Точилова. Издательство Ленинградского университета. – 1970. – 251с.

30 Розенблат В. В. Проблемы утомления / В. В. Розенблат. Изд.2-ое –М.: Медицина. – 1975. – 240 с.

31 Розенблюм Ю. З. Динамика зрительной работоспособности лиц, занятых на прецизионных работах / Ю. З. Розенблюм, Н. И. Тагаева, Т. А. Корнюшина // Офтальмоэргономика операторской деятельности. Тезисы докладов симпозиума, – Л. – 1979. – С.66–85.

32 Руководство по проектированию динамического освещения в производственных помещениях / НИИСФ Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, –1980. – 31 с.

33 СанПиН 2.2.4.3359-16. Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах. – Введ. 2017-01-01. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2017. – 69 с.: ил.

34 Соловьев В. Н. Физическое здоровье как интегральный показатель уровня адаптации организма студентов к учебному процессу / В. Н. Соловьев // Фундаментальные исследования. – 2005. – №6 – С. 61–66.

35 СП 52.13330.2016 (Актуализированная редакция СНиП 23-05-95\*). Естественное и искусственное освещение. – Введ. 2017-05-08. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2016. – 70 с.: ил.

36 Трахтенберг И. М. Гигиена умственного труда студентов / И. М. Трахтенберг, С. М. Рашман. – Киев: «Здоровь'я». – 1973. – 171 с.

37 Черниловская Ф. М. Освещение промышленных предприятий и его гигиеническое значение / Ф. М. Черниловская. – Л.: Медицина. – 1971. – 288 с.

38 Шанда Я. Свет как актиничное (фотохимически активное) излучение / Я. Шанда // Светотехника. – 2006. – № 3. – С. 51–53.

39 Dirks H., Horney L., Thomas M. Untersuchungen uber Leistung and Ermudung des Meuschen bei verschiehenen Lichbedingungen. // Lichttechnik, 1956, №. 7.

# ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

## Образцы протоколов измерения

### Протокол измерения остроты зрения для дали

Испытуемый, Ф.И.О., возраст \_\_\_\_\_

Дата	Время	Острота зрения $V$ , ед.	
		<i>OD</i>	<i>OS</i>

### Протокол измерения диастолического артериального давления, систолического артериального давления, частоты сердечных сокращений

Освещенность  $E =$  \_\_\_\_\_ лк Тип ИС \_\_\_\_\_

Испытуемый, Ф.И.О., возраст \_\_\_\_\_

Дата	Время	До работы			После работы		
		Диастолическое, мм рт ст	Систолическое, мм рт ст	Частота сокращений, 1/мин	Диастолическое, мм рт ст	Систолическое, мм рт ст	Частота сокращений, 1/мин

### Протокол измерения объема абсолютной аккомодации

Освещенность  $E =$  \_\_\_\_\_ лк Тип ИС \_\_\_\_\_

Дата	Время	$l_b$ , см			
		До работы		После работы	
		<i>OD</i>	<i>OS</i>	<i>OD</i>	<i>OS</i>

### Протокол измерения времени ахроматической адиспаропии

Освещенность  $E =$  \_\_\_\_\_ лк Тип ИС \_\_\_\_\_

Дата	До работы		После работы	
	Время	$t_a$ , с	Время	$t_a$ , с

### Протокол измерения расширенной корректурной пробы

Освещенность  $E =$  \_\_\_\_\_ лк Тип ИС \_\_\_\_\_

Дата	Время	Показатели		До работы	После работы
		Успешность ответов (%)	Кол-во ошибок (шт)		
		Средний темп ответов (мс)			
		Общее время (с)			

**Протокол  
измерения критической частоты слияния световых мельканий**

Освещенность E = \_\_\_\_\_лк      Тип ИС \_\_\_\_\_

Дата	Время	До работы		После работы	
		Критический период (мс)	Критическая частота (Гц)	Критический период (мс)	Критическая частота (Гц)

**Показатели производительности зрительной работы  
субъективной оценки световой среды**

Дата \_\_\_\_\_      Время \_\_\_\_\_      Освещенность E= \_\_\_\_\_лк      Тип ИС \_\_\_\_\_  
Испытуемый, Ф.И.О., возраст \_\_\_\_\_

Детали	Виды брака			
	Царапины (Нет)	Царапины (1)	Царапины (2)	Царапины (3)
Пластиковые изделия (Рассеиватель)				
Детали	Виды брака			
	Царапины (Нет)	Царапины (1)	Царапины (2)	Царапины (3)
Металлоизделия (Круглые заготовки)				
Детали	Виды брака			
	Царапины (Нет)	Царапины (1)	Царапины (2)	Царапины (3)
Металлоизделия (Квадратные заготовки)				
Детали	Сортировка токовых вводов			
	медь + платинит + никель		никель + платинит+ никель	медь + платинит(широкий) + никель
Металлоизделия (токовые вводы 3-х типов)				

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(справочное)

### Образец анкеты субъективной оценки световой среды

Дата \_\_\_\_\_ Время \_\_\_\_\_ Освещенность E= \_\_\_\_\_ лк Тип ИС \_\_\_\_\_

Испытуемый, Ф.И.О., возраст \_\_\_\_\_

1. Ваше самочувствие сегодня:

Очень плохое \_\_\_\_\_

Плохое \_\_\_\_\_

Удовлетворительное \_\_\_\_\_

Хорошее \_\_\_\_\_

Очень хорошее \_\_\_\_\_

2. Ваше настроение сегодня:

Очень плохое \_\_\_\_\_

Плохое \_\_\_\_\_

Удовлетворительное \_\_\_\_\_

Хорошее \_\_\_\_\_

Очень хорошее \_\_\_\_\_

1 Достаточность освещенности для выполнения работы

Категорийные оценки	Не достаточно	Достаточно	Вполне достаточно

2. Качественные показатели освещения

Показатели/ Категорийные оценки	Сильно заметны	Заметны	Едва заметны	Почти не заметны	Совсем не заметны
Пульсации					
Неравномерность освещенности в рабочей зоне					
Показатели/ Бальные оценки	Очень плохо	Плохо	Удовлетворительно	Хорошо	Очень хорошо
Качество цветопередачи ИС					

3. Оценка слепящего действия осветительной установки

Категорийные оценки	Очень заметно	Заметно	Едва заметно	Не заметно
Слепящее действие				

4. Общая оценка условий освещения

Балльные оценки	Очень плохо	Плохо	Удовлетворительно	Хорошо	Очень хорошо

5. Какой вариант предпочтительнее: со светодиодами или с ЛЛ?

5.1 СД Укажите причины \_\_\_\_\_

5.2 ЛЛ. Укажите причины \_\_\_\_\_

6. Ваши предложения по организации освещения:

Увеличить освещенность \_\_\_\_\_

Уменьшить освещенность \_\_\_\_\_

Не изменять освещенность \_\_\_\_\_

Изменить цветопередачу \_\_\_\_\_

Ограничить слепящее действие \_\_\_\_\_

Изменить распределение освещенности \_\_\_\_\_

7 Можно ли длительно выполнять напряженную зрительную работу в данных условиях освещения?

Да / Нет Укажите причины. \_\_\_\_\_