

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ  
«МЭИ»**

УДК:

Факультет ИРЭ (ЭТФ)  
Кафедра Светотехники  
Направление Электроника и  
наноэлектроника

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Программа Теоретическая и прикладная светотехника

Тема: **Исследование параметров и характеристик белых  
светоизлучающих диодов и осветительных приборов на их основе в  
системах динамического освещения**

Время выполнения работы с 1.09.2012 г. по 05.06.2014г.

Студент ЭР-04-08 Делян Р. А.  
*Группа* *подпись* *фамилия, и., о.*

Научный  
руководитель доцент Елисеев Н. П.  
*должность* *звание* *подпись* *фамилия, и., о.,*

Рецензент ст. инженер Круглова Т. С.  
*должность* *звание* *подпись* *фамилия, и., о.,*

Магистерская диссертация допущена к защите

Зав. Кафедрой к.т.н. Боос Г. В.  
*должность* *звание* *подпись* *фамилия, и., о.*

Дата \_\_\_\_\_

Москва " " \_\_\_\_\_ "2014г.

Исследование параметров и характеристик белых светоизлучающих диодов и осветительных приборов на их основе в системах динамического освещения

Делян Р. А. стр. 103, рис. 76, табл. 13, прил. 1.

### Аннотация

Рассмотрено влияние света на биоритмы человека. Изучены механизмы влияния на биоритмы человека и процесс выработки мелатонина под действием света.

Рассмотрен ассортимент современных цветных светодиодов. Изучены методы моделирования спектров белых четырехкристальных светодиодов. Изучены новые методы оценки цветопередачи. Разработана компьютерная программа в среде MATLAB для моделирования спектров белых светодиодов и расчёта их цветовых и фотобиологических характеристик.

С помощью программы проведён анализ факторов, имеющих влияние на цветовые характеристики излучения белого светодиода.

Получены результаты, позволившие сформулировать требования к белым светодиодам, выполнение которых даст возможность применять их в осветительных установках с высокими требованиями к качеству освещения и в светодинамической среде.

### The summary

The influence of light on human biorhythms. The mechanisms of influence on human biorhythms and the process of production of melatonin by light.

Considered range of modern colored LEDs. Studied methods of modeling spectra multichip white LEDs. Study new methods for assessing color. A computer program in MATLAB to simulate the spectra of white LEDs and calculating their color and photobiological characteristics.

With the help of the program analyzes the factors that have an impact on the color characteristics of a white LED light.

The results obtained enabled us to formulate requirements for white LEDs, the implementation of which will provide an opportunity to apply them in lighting systems with high demands on quality lighting and dynamic lighting environment.

## **Введение**

По сообщению Всемирной организации здравоохранения, здоровье – это не только отсутствие болезней и недугов, но и состояние полного благополучия: физического, психического и социального [34].

Психические нагрузки, утомление и стрессы, нарушения циркадных ритмов, изменения гормонального баланса, депрессии, вызванные несоответствием световой среды и общего дизайна помещений, создают угрозу здоровью.

Качественная оценка освещения производится, как правило, после оценки количественных критериев. Физиологические компоненты зрения учитываются, но не полностью отражают сложные процессы зрительного восприятия. Знание этих процессов необходимо для получения объективных критериев - оценки качества освещения помещений с точки зрения выполнения различных требований (в плане эксплуатации, трудовой деятельности, зрительных задач) [34].

В начале 2000-х годов обнаружен неизвестный ранее тип глазных рецепторов (ipRGC), не участвующих в зрительном процессе, но синхронизирующих функционирование организма с состоянием световой среды.

Основа успешного проектирования освещения — требования к количеству света, его спектру, распределению, времени и продолжительности воздействия с целью обеспечить максимальную пользу для человека. Новые технологии и новые источники света должны учитывать новые стандарты и правила освещения.

В связи появлением на рынке нового типа источника – СД, появилась возможность создания энергоэффективного, безопасного для окружающей среды, компактного источника света с длительным сроком службы. Быстрый темп увеличения световой отдачи и усовершенствование методики отбора (биннирования) цветных СИД позволяют говорить о блестящей перспективе создания источника белого света на основе цветных кристаллов, более

эффективного и удовлетворяющего необходимым качественным и количественным показателям для многочисленных осветительных установок [19].

Также СИД позволяют создать спектр любой Тцв, на основе принципа цветосмещения (RGB), что дает возможность реализовывать динамичное управления спектром (цветом) излучения, с новыми возможностями влияния на биологические процессы в организме человека [38].

Полупроводниковые ИС - принципиально новые по своей природе ИС в светотехнике. Многие их особенности в этом качестве до сих пор не изучены. Поэтому представляется актуальным исследование цветowych и фотобиологических характеристик таких ИС и формулировка требований к ним, выполнение которых позволит применять СД в динамичном освещении.

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«МЭИ»**

Факультет ИРЭ (ЭТФ) Кафедра Светотехники

Направление Электроника и наноэлектроника

**ЗАДАНИЕ НА МАГИСТЕРСКУЮ  
ДИССЕРТАЦИЮ**

по программе подготовки магистров Теоретическая и прикладная светотехника  
210100

Тема: **Исследование параметров и характеристик белых  
светоизлучающих диодов и осветительных приборов на их основе в  
системах динамического освещения**

Время выполнения работы с 1.09.2012 г. по 05.06.2014 г.

Студент Деян Р. А. ЭР-04-08  
*фамилия, и., о. группа подпись*

Научный руководитель доцент, Елисеев Н. П.  
*должность, звание, фамилия, и., о., подпись*

Консультант \_\_\_\_\_  
*должность, звание, фамилия, и., о.*

Зав. кафедрой к.т.н., Боос Г. В.  
*звание, фамилия, и., о., подпись, дата, № приказа утверждения задания*

Место выполнения научной работы НИУ «МЭИ» (ТУ) кафедра «Светотехника»

Москва \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2014г.

## 1. Обоснование выбора темы диссертационной работы

В начале 2000-х годов обнаружен ранее неизвестный тип глазных рецепторов, не участвующих в зрительном процессе, но синхронизирующих функционирование организма с состоянием световой среды. Высокая энергоэффективность светоизлучающих диодов и их уникальная возможность создания источников света с любой цветовой температурой позволяет говорить о использовании этих источников излучения в осветительных установках со светодинамической средой. Поэтому представляется актуальным исследование цветowych и фотобиологических характеристик таких ИС и формулировка требований к ним, выполнение которых позволит применять СД в динамичном освещении.

Научный руководитель Елисеев Н. П. Дата \_\_\_\_\_

Студент Делян Р. А. Дата \_\_\_\_\_

## 2. Консультации по разделу

\_\_\_\_\_

Подпись консультанта \_\_\_\_\_ Дата \_\_\_\_\_

## 3. Консультации по разделу

\_\_\_\_\_

Подпись консультанта \_\_\_\_\_ Дата \_\_\_\_\_

#### 4. Пояснительная записка

№ п/п	Содержание разделов	Срок выполнения	Трудоёмкость
I	Теоретическая часть		
	Изучение влияния светодиодного освещения на психофизическое состояние человека	01.09 – 1.12	10%
	Изучение методов моделирования спектров цветных и белых СД.	1.12 – 15.12	15%
	Изучение методов расчёта цветовых характеристик белых СД.	15.12 – 1.01	5%
II	Разработка в среде MATLAB программы для моделирования характеристик белых СД	1.02– 15.04	30%
	Моделирование и расчёт цветовых характеристик белых СД	15.04– 1.05	15%
III	Оформление диссертации	1.05 – 15.05	15%

## 5. Рекомендуемая литература

1. В.В. Мешков, А.Б. Матвеев «Основы светотехники», часть 2, \_\_\_\_\_

Энергоатомиздат, 1989 г. \_\_\_\_\_

2. А. Берг, П. Дин «Светодиоды», изд. «Мир», 1979 г. \_\_\_\_\_

3. Ф. Е. Шуберт «Светодиоды» / пер. с англ. под ред. А. Э. Юновича. – \_\_\_\_\_

2-е изд.-М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496с. - ISBN 978-5-9221-0851-5. \_\_\_\_\_

4. Д. Х. Хьюбел «Глаз, мозг, зрение», издательство «Мир», 1990 г. \_\_\_\_\_

---

---

---

---

6. Краткие сведения о студенте:

Домашний адрес г. Балашиха, ул. Леоновское шоссе, д.9 \_\_\_\_\_

---

Телефон служебный 8-925-707-84-26 домашний \_\_\_\_\_

ПРИМЕЧАНИЕ: Задание брошюруется вместе с диссертацией и с отзывами руководителя и рецензентов.



Содержание.	
Введение.....	3
1. Литературный обзор.....	11
1.1. Строение и функции органа зрения.....	11
1.2. Световые ритмы и биоритмы.....	19
1.3. Влияние света на здоровье человека.....	21
1.4. Влияние света на самочувствие.....	26
1.5. Опасность синего света.....	29
1.6. История создания светодиодов.....	31
1.7. Принцип работы и устройство СД.....	35
1.8. Способы создания белых светодиодов.....	38
1.9. Характеристики СД.....	40
2. Расчётная и аналитическая часть.....	45
2.1. Методы оценки цветопередачи СД.....	45
2.1.1. Метод оценки цветовой передачи CRI.....	46
2.1.2. Метод оценки цветовой передачи CQS.....	48
2.2. Функция оносительной спектральной циркадной эффективности.....	49
2.3. Программа.....	51
2.3.1. Моделирование спектров цветных СД.....	53
2.3.2. Определение спектра белого четырёхкристального СД с заданной цветностью.....	54
2.3.3. Расчёт световой отдачи белого СД.....	55
2.3.4. Расчет биологической эффективности излучения .....	55
2.3.5. Расчёт цветопередачи белого ИС методом CRI.....	56
2.3.6. Расчёт цветопередачи белого ИС методом CQS.....	59
2.3.7. Расчет влияния возраста человека на восприятие им излучения белого СД.....	61
3. Результаты расчётов.....	62
3.1. Влияние способа аппроксимации спектра цветных СД на характеристики белого СД.....	63
3.2. Влияние тока через СД на его характеристики.....	72
3.3. Влияние температуры на внешней поверхности СД на его характеристики.....	81
3.4. Влияние цветовой температуры на световую отдачу белого СД.....	90
3.5. Влияние возраста человека на восприятие им излучения белого СД.....	91
4. Выводы.....	97
5. Приложение .....	102

### **Список сокращений.**

СД – светодиод (-ный)

МКО - Международная комиссия по освещению

КПД - коэффициент полезного действия

ИС - источник света

ОС – оптическая система

ОУ – осветительная установка

ЛЛ – люминесцентные лампы

НЛВД – натриевая лампа высокого давления

МГЛ – металлогалогенная лампа

ДРЛ – дуговая ртутная люминесцентная

Ra – общий индекс цветопередачи

Ri – частный индекс цветопередачи

Qa- индекс шкалы цветности

$\lambda_p$  – длина волны, соответствующая спектральному максимуму излучения

$\Delta\lambda_{0.5}$  – ширина спектра излучения на уровне 0.5 от спектрального максимума излучения

T<sub>цв</sub> – цветовая температура

ЧТ – чёрное тело

## 1. Литературный обзор

### 1.1 Строение и функции органа зрения

Орган зрения – важнейший из органов чувств. Он обеспечивает человеку до 90% информации и теснейшим образом связан с мозгом. Светочувствительная оболочка органа зрения развивается из мозговой ткани [1].

Орган зрения, представляющий собой периферическую часть зрительного анализатора, состоит из глазного яблока (глаза) и вспомогательных органов глаза, которые расположены в глазнице.

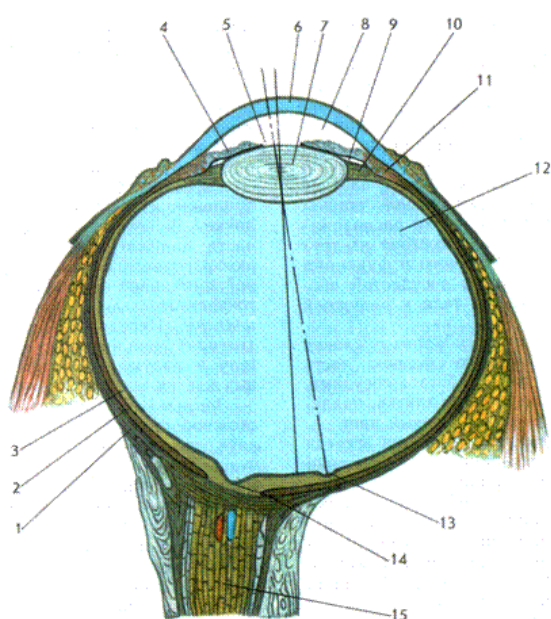


Рис. 1. Схема строения глазного яблока:

- 1 – фиброзная оболочка (склера),
- 2 – собственно сосудистая оболочка,
- 3 – сетчатка, 4 – радужка, 5 – зрачок,
- 6 – роговица, 7 – хрусталик,
- 8 – передняя камера глазного яблока,
- 9 – задняя камера глазного яблока,
- 10 – ресничный пояс,
- 11 – ресничное тело,
- 12 – стекловидное тело,

13 – пятно (желтое), 14 – диск зрительного нерва, 15 – зрительный нерв.

Сплошная линия – наружная ось глаза, пунктирная – зрительная ось глаза

Глазное яблоко имеет шаровидную форму. Оно состоит из трех оболочек и ядра (рис. 1). Наружная оболочка – фиброзная, средняя – сосудистая, внутренняя – светочувствительная, сетчатая (сетчатка). Ядро глазного яблока включает хрусталик, стекловидное тело и жидкую среду – водянистую влагу.

Зрительная часть сетчатки имеет сложное строение. Она состоит из двух листков: внутреннего – светочувствительного и наружного – пигментного. Клетки пигментного слоя участвуют в поглощении света, попадающего в

глаз и прошедшего через светочувствительный листок сетчатки. Внутренний листок сетчатки состоит из нервных клеток, расположенных в три слоя: наружный, прилежащий к пигментному слою, – фоторецепторный, средний – ассоциативный, внутренний – ганглиозный.

Фоторецепторный слой сетчатки состоит из нейросенсорных палочковидных и колбочковидных клеток, наружные сегменты которых (дендриты) имеют форму палочек или колбочек. Дискотипные структуры палочковидных и колбочковидных нейроцитов (палочек и колбочек) содержат молекулы фотопигментов: в палочках – чувствительные к свету (черно-белому), в колбочках – чувствительные к красному, зеленому и синему свету.

В палочках сетчатки человека содержится пигмент родопсин, или зрительный пурпур. В колбочках найден пигмент йодопсин, который включает в себя пигменты хлоролаб и эритролаб; первый из них поглощает лучи, соответствующие зеленой, а второй – красной части спектра. На сегодняшний день пигмент, который чувствителен к синей части спектра, не найден, хотя за ним уже закреплено название – цианолаб [3].

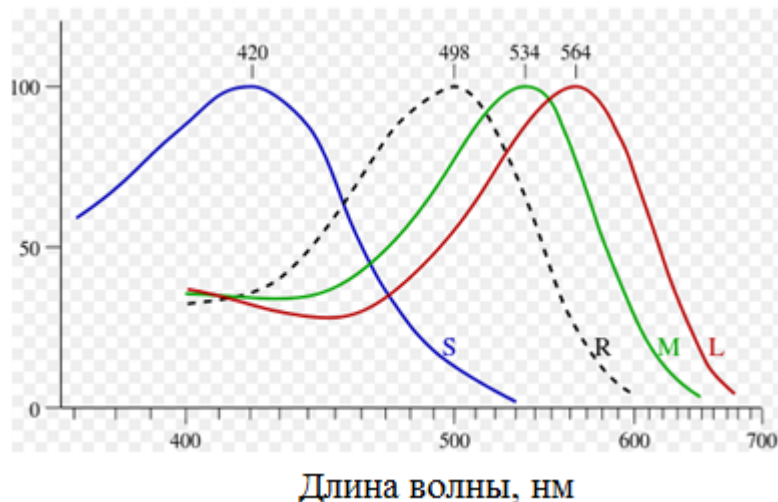


Рис.2. Кривые спектров поглощения пигментов содержащихся в колбочках и палочках сетчатки глаза человека. Спектры поглощения коротких (S), средних (M) и длинноволновых (L) пигментов - цианолаб, хлоролаб и эритролаб соответственно и спектр поглощения пигментов в палочках - родопсина при слабом (сумеречном) освещении (R) [3].

Количество колбочек в сетчатке глаза человека достигает 6 – 7 млн., а количество палочек – в 20 раз больше [1]. Колбочки функционируют в условиях больших освещённостей, они обеспечивают дневное и цветное зрение, палочки, более светочувствительны и ответственны за сумеречное зрение. [21].

Палочки и колбочки – это нервные клетки, специализированные таким образом, чтобы генерировать электрические сигналы при попадании на них света. Задача остальной части сетчатки и самого мозга – использовать эти сигналы, чтобы извлечь биологически полезную информацию. Результатом будет зрительная сцена со всей сложностью форм, глубины, движения, цвета и текстуры [24]. Колбочки расположены в центральной части сетчатки и каждая их группа непосредственно связана с мозгом через внутреннюю поверхность сетчатки и зрительный нерв. Также с этими прямыми соединениями в сетчатке имеется неисчислимое количество локальных проводящих путей. Свет, пересекая стекловидное тело, сначала проходит через слой нервной ткани сетчатки и кровеносные сосуды и лишь затем попадает на слой палочек и колбочек [22].

На нижней поверхности мозга правый и левый зрительные нервы образуют частичный перекрест. В зрительном перекресте на другую сторону переходят только те нервные волокна зрительного нерва, которые идут от медиальной части сетчатки. Таким образом, позади зрительного перекреста в составе зрительного тракта идут нервные волокна от латеральной (височной) части сетчатки «своего» глаза и медиальной (носовой) части сетчатки другого глаза. Далее нервные волокна идут к подкорковым зрительным центрам – латеральному коленчатому телу и верхним холмикам пластинки четверохолмия среднего мозга. Из подкорковых центров зрения зрительные импульсы направляются в корковый центр зрения – кору затылочной доли мозга, где происходит высший анализ зрительных восприятий.

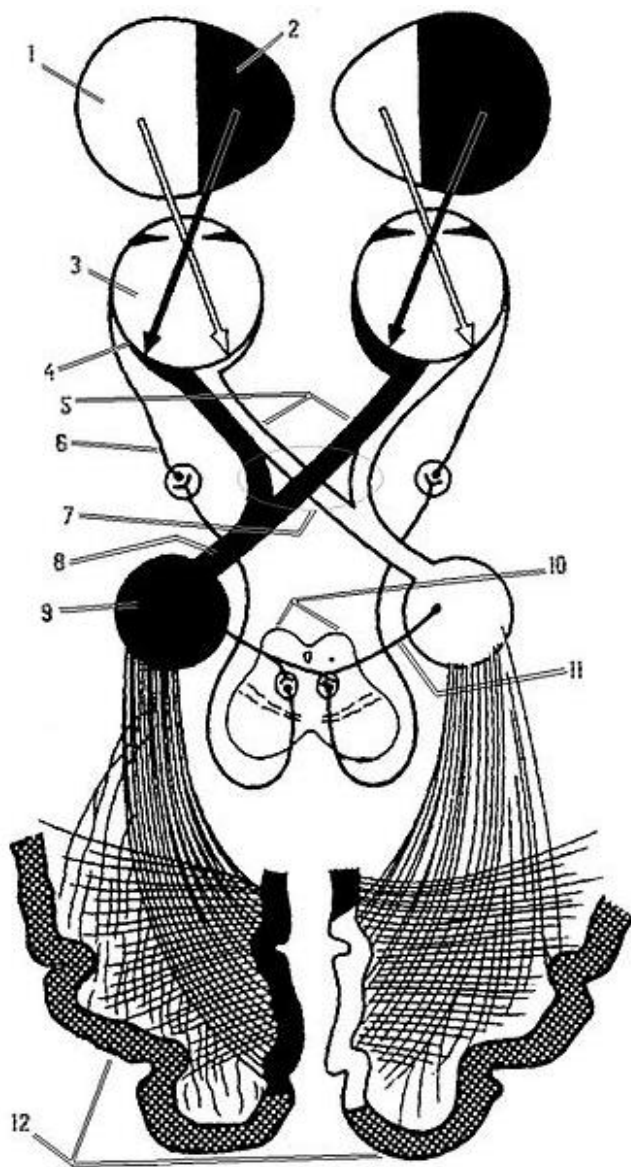


Рис. 3. Проводящие пути зрительного анализатора:  
 1- левая половина зрительного поля;  
 2-правая половина зрительного поля;  
 3 - глаз;  
 4 - сетчатка;  
 5 - зрительные нервы;  
 6 - глазодвигательный нерв;  
 7 - хиазма;  
 8 - зрительный трактат;  
 9-латеральное коленчатое тело;  
 10 - верхние бугры четверохолмия;  
 11 - неспецифический зрительный путь;  
 12 – зрительная кора головного мозга.

Зрение двумя глазами (бинокулярное зрение) дает возможность видеть рельефное изображение предметов, глубину их расположения, оценивать расстояние, на котором они находятся. При рассматривании какого-либо предмета правый глаз видит его больше с правой стороны, левый – с левой стороны. В то же время человек эти два изображения воспринимает как одно. Бинокулярное зрение возможно благодаря тому, что изображение возникает на идентичных, соответствующих друг другу, участках сетчатки правого и левого глаза.

Работая сообща, объединяя зрительную информацию, оба глаза обеспечивают стереоскопическое (объемное) зрение, которое позволяет

получить более точные представления о форме, величине и глубине расположения предметов [2].

В 2002 году Дэвид Берсон и соавторы из Университета Брауна (США) впервые обнаружили третий тип фоторецепторов в сетчатке млекопитающих. Этот новый фоторецептор является "недостающим звеном" в описании механизма незрительных эффектов, контролируемых светом и тьмой [5].

В 2007 году F. H. Zaidi, R. G. Foster, G. C. Brainard, C. A. Czeisler и S. W. Lockley, объединившись с другими исследователями, обнаружили у людей во внутренней сетчатке рецепторы, идентичные рецепторам некоторых других млекопитающих (ipRGC). Для исследования привлекались пациенты с редкими болезнями, исключаяющими наличие классических палочек и колбочек, но у которых функционировали клетки ipRGC. Несмотря на отсутствие палочек и колбочек, у пациентов были выявлены циркадный фотозахват, циркадные поведенческие реакции и реакции сужения зрачка [8].

Клетки ipRGC (intrinsically photosensitive Retinal Ganglion Cell - внутренние фоточувствительные клетки ганглии сетчатки) - третий вид чувствительных клеток, которые участвуют в циркадных ритмах, расположенных на внутренней стороне сетчатки (часть сетчатки, которая ближе к стекловидному телу глаза).

Даже при блокировании классических фоторецепторов (палочек и колбочек) или при применении фармакологических агентов, а также при отделении их от сетчатки, клетки ipRGC продолжали реагировать на излучение. Это означает, что они представляют собой третий класс рецепторов сетчатки глаза, которые возбуждаются под действием излучения [8].

На рисунке 4 показана связь нерва между колбочками и палочками в глазе и зрительной коры головного мозга.

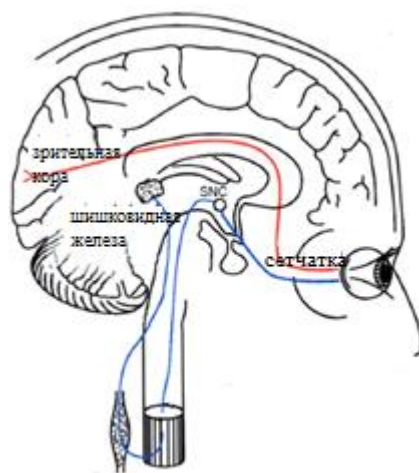


Рис. 4. Зрительные и незрительные пути в мозге: нервные связи между сетчаткой глаза, с его колбочками и палочками, и зрительной коры, с одной стороны (красная линия) и между сетчаткой, с клетками ipRGC, и супрахиазматическим ядром (SNC) и шишковидной железой (синяя линия).

Обнаруженные фоторецепторные клетки в сетчатке глаза контролируют незрительные эффекты. Когда свет достигает этих клеток, происходит комплекс химических реакций (здесь с участием фотопигмента меланопсина), далее создавая электрические импульсы. Эти клетки имеют «свои» нервные соединения, в частности, супрахиазматическое ядро (SNC), которое является биологическими часами мозга и шишковидной железы.

За год до открытия Берсона, Джордж К. Брейнард обнаружил, что уровень мелатонина у человека сократился больше всего, когда добровольцы с расширенными зрачками подвергались действию в течение 90 минут между 2:00 часами ночи и 3:30 утра монохроматическим синим светом с длиной волны 464 нм и при освещенности глаза (зрачка) всего 0,1 лк, что эквивалентно освещенности при лунном свете. Брейнард предположил о "новом" незрительном фоторецепторе, отдельном от палочек и колбочек, которым впоследствии оказался меланопсин [6].

Меланопсин, чувствительный к фотопигменту синего света, находится в небольшом количестве в клетках ipRGC. Клетки ipRGC находятся глубоко в сетчатке глаза под палочками и колбочками. Эти специализированные клетки



не являются зрительными фоторецепторами и как, считалось ранее только передавали по нерву к мозгу импульсы, возбужденные светом, падающим на палочки и колбочки [6].

Чувствительность клеток ipRGC изменяется для различных длин волн света. На основе биологического фактора "подавления мелатонина", Брейнард (Brainard) был уже в состоянии определить спектральную кривую "биологического действия". Эта кривая приведена на рисунке 5, вместе с кривой чувствительности колбочек глаза.

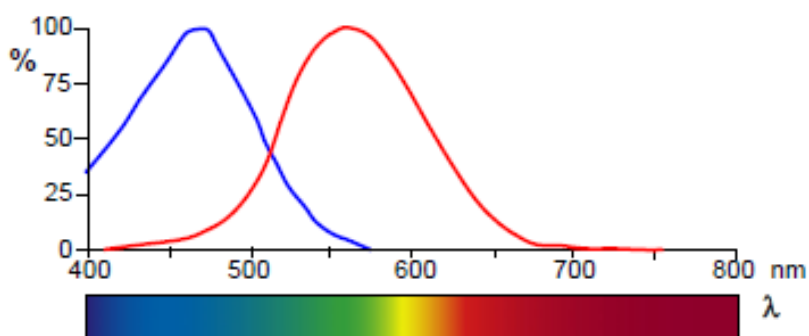


Рис. 5. Относительная спектральная циркадная эффективность (на основе подавления мелатонина), синяя кривая, (источник: Brainard), а также относительная спектральная кривая чувствительности глаза, красный кривая.

При сравнении двух кривых видно, что кривая относительной спектральной циркадной эффективности довольно сильно отличается от относительной спектральной кривой чувствительности глаза. Максимум спектральной чувствительности глаза лежит в диапазоне желто-зеленых длин волн - 555 нм, в то время как максимум спектральной циркадной эффективности лежит в синей области спектра - на длинах волн между 460 и 464 нм. Это явление имеет важное значение при создании установок, обеспечивающих более комфортные условия для человека [5].

Клетки ipRGC сетчатки управляют человеческими циркадными ритмами, сложной биологической системой, через восприятие света, передают нашему организму, как регулировать различные функции

организма, такие как температура тела, выброс гормонов из гипофиза, режим сна, и воспроизводство мелатонина шишковидной железой [6].

Клетки ipRGC имеют три первичные функции:

1) играют главную роль в синхронизации циркадных ритмов в течение 24 ч одного светового/темнового цикла;

2) передают информацию в другие отдела мозга, например в область мозга, контролирующую зрачок, и в овальное претектальное ядро. Таким образом, они вносят вклад в регулирование размера зрачка и другие поведенческие реакции при изменении окружающего освещения;

3) принимают участие в защите глаза от излучения и в подавлении реакции на внезапное "острое" освещение (прямое солнечное освещение, электросварка, луч прожектора и др.) благодаря выделению гормонального мелатонина из шишковидной железы [8].

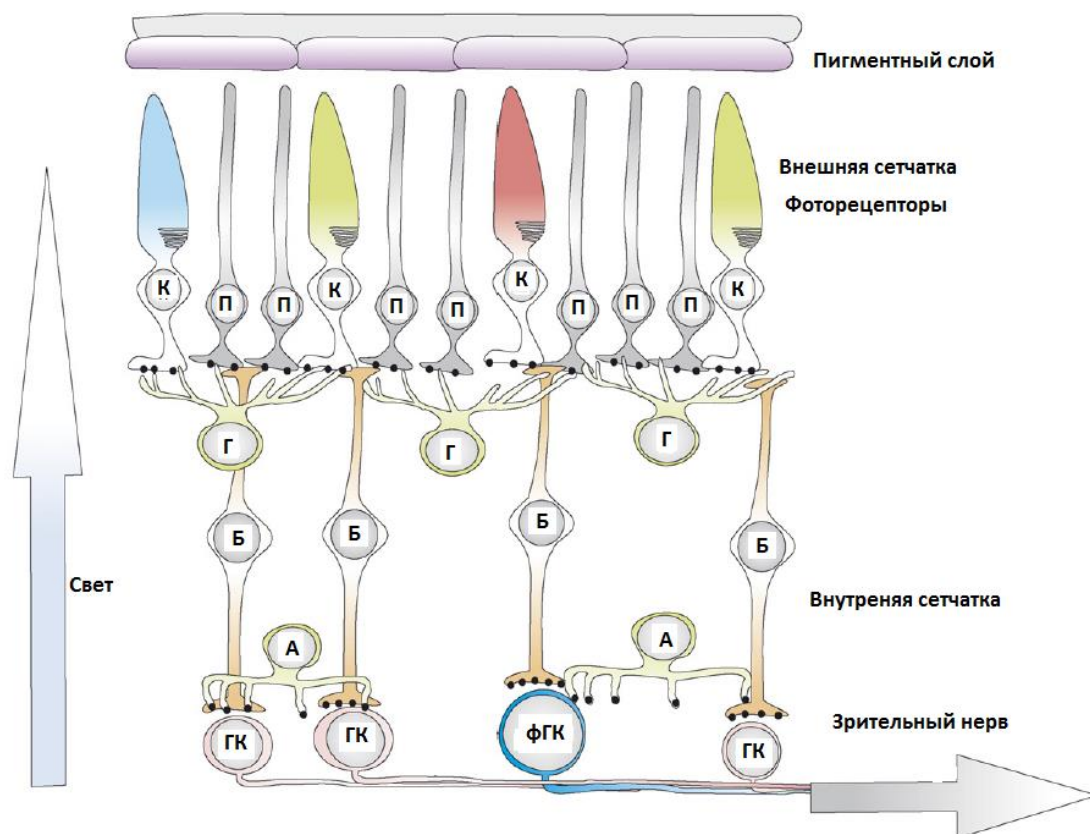


Рис. 6. Строение сетчатки: К - колбочки, П- палочки, Г -горизонтальные клетки, Б - биполярные клетки, А - амакриновые клетки, ГК - ганглиозные клетки, фГК - фоточувствительные клетки ганглия.

## 1.2. Световые ритмы и биоритмы.

Свет регулирует циркадные (ежедневные) и годовые (сезонные) ритмы целого ряда физических процессов. Рисунок 7 иллюстрирует некоторые стандартные ритмы у человека. На рисунке показаны только несколько примеров: температура тела, внимание, и гормоны кортизола и мелатонина.

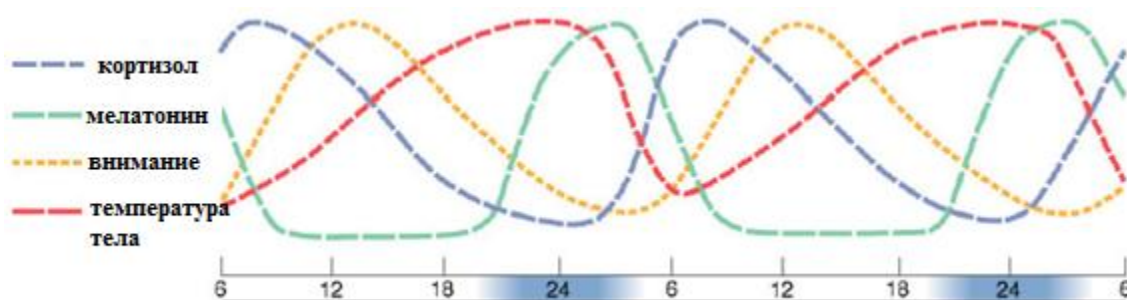


Рис. 7. Двойной график (2x24 часов). Стандартные суточные ритмы температуры тела, мелатонина, кортизола в организме человека и внимания для естественного 24-часового цикла день/ночь.

Гормоны кортизол ("гормон стресса") и мелатонин ("гормон сна") играют важную роль в управлении внимания и сна. Кортизол, также, повышает уровень сахара в крови и укрепляет иммунную систему. Однако, при высоком уровне кортизола длительный период, организм истощается и становится слабым. Уровень кортизола увеличивается утром и подготавливает тело к работе на будущий день. Он остается на достаточно высоком уровне на протяжении всей светлой части дня, падая, до минимума к полуночи. Уровень гормона сна мелатонина падает утром, уменьшая сонливость. Как правило, он поднимается снова, когда становится темно, что обеспечивает здоровый сон (так как кортизол находится на минимальном уровне). Для нормального здоровья, важно чтобы эти ритмы не были нарушены. В случае нарушения ритма, яркий свет в первой половине дня помогает восстановить нормальный ритм.

В естественной обстановке, свет, особенно утренний, синхронизирует внутренние биологические часы с 24-часовым циклом день/ночь. Без ежедневного воздействия света, несинхронизированный период нашей

циркадной системы будет дольше, чем 24 часа. Как следствие, будет происходить все большие отклонения изо дня в день уровня температуры тела, кортизола и мелатонина от стандартных суточных ритмов. Эта дегармонизация в отсутствие "нормального" ритма день/ночь может привести к неправильному ритму активности и сонливости, что в конечном счете, приводит к активности в темное время суток и сонливости днем. По той же причине, такие же симптомы, связаны с нарушением биоритмов после путешествий через несколько часовых поясов. Вахтовые работники также испытывают те же симптомы в течение нескольких дней после каждой пересменки [5].

Хронобиологические и психологические исследования показали, что подгонка к суточному ритму, то есть привязка биологических циклов к естественным, имеет решающее значение с точки зрения обеспечения настроения, работоспособности и здоровья. Кроме того, стимулирующий биологическую систему свет усиливает восприимчивость и приводит к улучшению познавательной деятельности, активируя работу человеческого мозга [9].

Исследования, проведенные Brainard и др. (2001), связанные с анализом подавления мелатонина, показали, что кривая спектральной циркадной эффективности фото-биологической системы имеет максимум в диапазоне 460 - 464 нм. Для достижения максимального эффекта, нужно создавать высокий уровень освещенности на рабочей поверхности или использовать лампы с увеличенной долей синего излучения в диапазоне длин волн 460 - 464 нм. Более высокие уровни освещенности также влияют на электроэнцефалограмму (ЭЭГ), человек становится более внимательным и менее сонным. Можно, таким образом, использовать ежедневную динамику в освещении для повышения производительности труда, например, путем изменения освещенности и цветовой температуры в зависимости от времени суток [7]. С точки зрения хронобиологии подобные изменения следует обеспечить в комнатах, в которых люди находятся длительное время днём

или ночью. Биологическое действие света должно быть использовано таким образом, чтобы обеспечить стабилизацию ритма сна-бодрствования. Это предполагает создание более высокого уровня освещения с большей синей составляющей в глубине комнат в дневное время [9]. Высокий уровень освещенности холодного света разбудит нас утром и сделает нас более внимательными во время обеда. Низкая освещенность с теплой цветовой температурой оказывают успокаивающее действие [7].

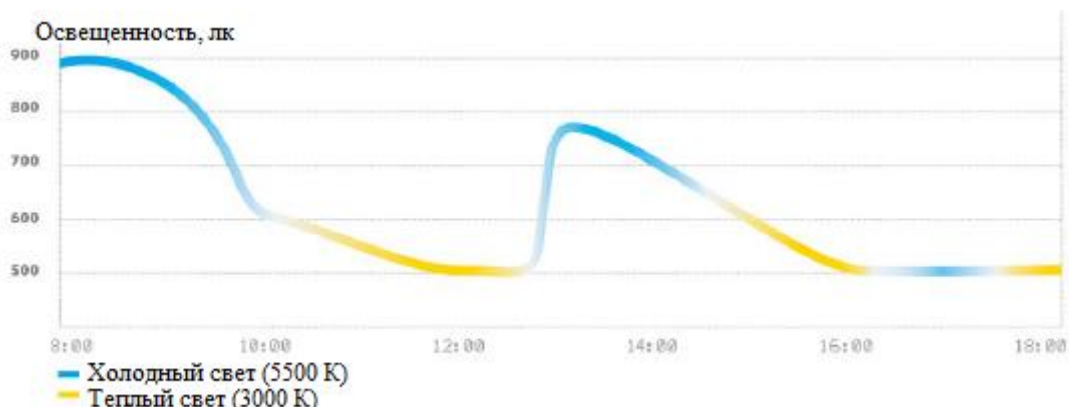


Рисунок 8. Зависимость активности человека от соотношения уровней освещенности и Тцв.

### 1.3. Влияние света на здоровье человека.

На сегодняшний день, в развитых странах мира уделяется большое внимание гипотезе о том, что подавление мелатонина под воздействием света в ночное время может быть одной из причин высоких темпов заболевания раком молочной железы и колоректального рака.

Исследователи косвенно ссылаются на воздействие света на вахтовых рабочих в ночное время и учащения заболеваний раком груди и колоректальным раком. Одним из возможных механизмов является подавление мелатонина при воздействии света в ночное время на вахтовых рабочих. Гормон шишковидной железы мелатонин обычно производится в ранние утренние часы, но подавляется воздействием светом в ночное время на открытые глаза.

Косвенная связь рака молочной железы с действием света на человека в ночное время подкрепляется экспериментами над лабораторной крысами Дэвида Э. Бласка (Blask) и коллег [6]. В своих исследованиях он показал, что мелатонин действует как защитный онкостатический носитель, который подавляет темпы роста клеток рака молочной железы человека. Мелатонин вероятно осуществляет аналогичную защиту в организме человека.

В своем открытии Дэвида Э. Берсон обнаружил, что максимум чувствительности ганглиозных клеток сетчатки находится в синей части спектра (рис. 5), что связано с биоритмами человека. Эти открытия важны, так как часто используемые современные газоразрядные лампы, такие как МГЛ, ДРЛ, НЛВД и ЛЛ имеют выраженные полосы излучения в коротковолновой части спектра.

Из-за своей способности замедлять воспроизводство мелатонина, свет действует как лекарство. Снижение уровня мелатонина у человека, связанное с воздействием света на открытые глаза в ранние утренние часы, может объяснить рост заболеваемости некоторыми видами рака в развитых странах мира.

Первоначально лампы накаливания были тусклыми и их теплый свет существенно не влиял на циркадные механизмы. Современные источники света стали более эффективными, но также и более яркими. Сегодняшние лампы излучают больше в синей области спектра, чем ранние керосиновые лампы и лампы накаливания. Медицинские исследования показывают, что синий свет является очень эффективным в снижении естественно уровня мелатонина у человека.

Подавление мелатонина зависит от цвета света, его интенсивности и продолжительности воздействия на органы зрения (как открытые, так и закрытые) источников света. Исследование, проведенное Т. Хатоненом и соавторами [6], показало, что только у двух из восьми человек при освещении закрытых глаз 2000 лк белого света в течение 60 минут между 0:00 и 2:00 часами ночи наблюдалось снижение уровня мелатонина. Авторы

сомневаются, что у людей, спящих с закрытыми глазами в городских условиях, будет происходить подавление мелатонина.

Исследования показали, что при освещенности 100 люкс (допустимый уровень освещенности в гостиной) для подавления мелатонина на 50% необходимо:

для монохроматического красного света - 403 часа;

для свечи - 66 минут;

для лампы накаливания 60 Вт - 39 минут;

для люминесцентной лампы 58 Вт - 15 минут;

для мощных белых LED - 13 минут.

Синее излучение света подавляет мелатонин в большей степени: Брейнард показал в экспериментах с людьми, даже очень тусклый (0,1 люкс) синий свет подавляет больше мелатонина, чем другие цвета. Таким образом, воздействие на открытые глаза источников света в ночное время, содержащих синее излучение (газоразрядные и люминесцентные лампы содержат выраженное излучение в коротковолновой части спектра) могут представлять потенциальную опасность для здоровья человека.

С.В. Локли и др. обнаружили, что в течение 6,5 часов монохроматический синий свет (460 нм) вызывает:

а) циркадное фазовое запаздывание в два раза больше, при облучении 460 нм, чем при 555 нм (дневного света),

б) подавление мелатонина в два раза больше при облучении 460 нм, чем при 555 нм [6].

Качество освещения всегда должно быть достаточно высоким, чтобы гарантировать зрительную работоспособность, необходимую для решения зрительных задач. Тем не менее, фактическая зрительная работоспособность человека зависит не только от качества освещения, но и от собственной "способности зрения". В этом отношении, возраст является важным критерием, так как требования к освещению увеличиваются с возрастом. На рисунке 9 показано относительное количество света, необходимое для

прочтения хорошо напечатанной книги в зависимости от возраста. Это исследование проводилось с испытуемыми, которые носили очки для чтения, если это требовалось. Как видно из этой кривой, влияние возраста является существенным. Одной из многих причин влияния возраста является ухудшение пропускания хрусталика глаза: хрусталик постепенно желтеет (см. рисунок 10) [5].

Низкое пропускание хрусталика у пожилых людей особенно преобладает в короткой области длин волн. Это объясняет, например, почему пожилым людям становится все труднее различать оттенки синего. В дополнение к снижению распознавания цвета, диаметр поля зрения также уменьшается. Хрусталик рассеивает больше света, при этом на сетчатке суммируется яркость светорассеяния и яркость изображения. Увеличение абсолютного порога яркости означает, что чем старше глаз, тем больше времени требуется для адаптации к различным условиям. Глаз пожилого человека не так чувствителен к различным контрастам, но более чувствителен к бликам, из-за чего становится более затруднительным видеть предметы ясно [10].

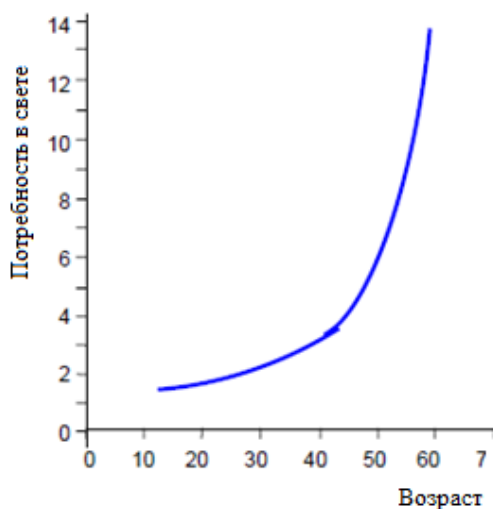


Рис. 9. Соотношение между возрастом и относительным количеством света, необходимого для чтения хорошего шрифта (источник: Fortuin).



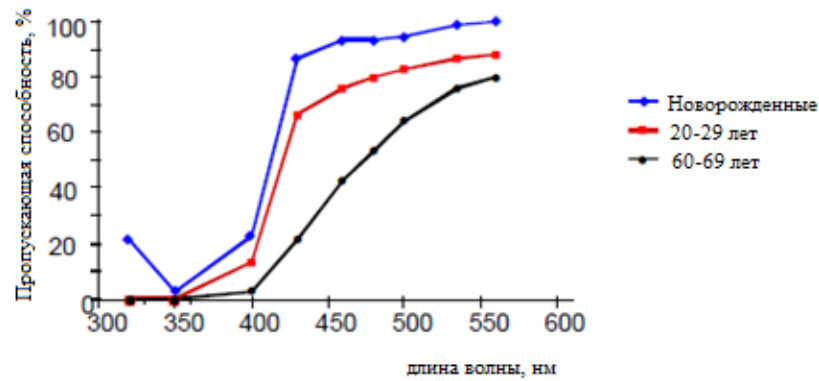


Рис. 10. Пропускание хрусталика для различных возрастных категорий. Величины выражены как процентное отношение от точки 560 нм для новорожденных (источник: адаптировано из Brainard и др.).

На рисунке 11 приведены результаты исследований, касающихся влияния качества освещения на зрительную работоспособность. На рисунке представлены кривые зависимости относительной зрительной работоспособности от уровня освещенности для различных зрительных задач: первая - для умеренно трудных задач (например, работа в офисе или общей машинной работы в промышленных условиях), вторая - для трудных задач (например, тонкая сборочная работа). Наблюдается явное увеличение зрительной работоспособности с повышением уровня освещенности.

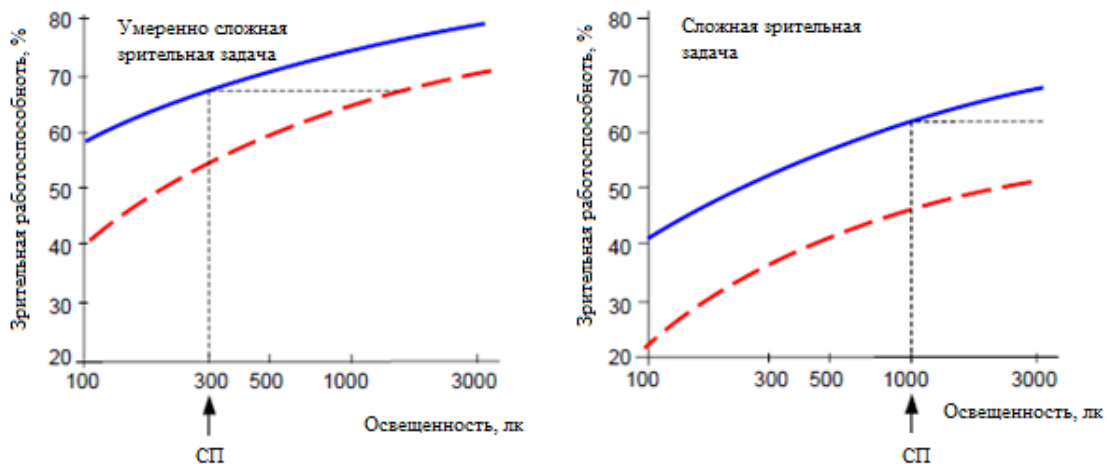


Рис. 11. Соотношение между относительной зрительной работоспособностью (в %) и уровнем освещенности (в люксах). Непрерывная синяя линия: молодые люди; пунктирная красная линия: пожилые люди.

График показывает, большинство рекомендаций и стандартов качества освещения ориентированы на людей в возрасте около 30 лет. С другой стороны, зрительная работоспособность пожилых работников значительно ниже. При решении умеренно сложных задач её возможно компенсировать за счет повышения уровня освещенности.

Конечно, улучшение зрительной работоспособности, в свою очередь обеспечивает улучшение работоспособности, которая отражается более высокой производительностью и уменьшением числа ошибок. Степень, в которой хорошее качество освещения повышает производительность работы зависит, конечно, от зрительной составляющей задачи. Хорошие условия наблюдения будут приносить пользу более задачам с важной зрительной составляющей, чем задачи с менее важной зрительной составляющей [5].

#### 1.4. Влияние света на самочувствие

Освещение определяет, что и как мы видим, следовательно, освещение влияет на наше настроение и наше восприятие окружающего пространства. Если уровень освещенности настолько низок, что люди чувствуют, что они не могут выполнять свою работу хорошо, то это будет оказывать негативное влияние на их самочувствие. Нормы освещенности, которые используются сегодня, направлены на обеспечение достаточно света, чтобы мы могли выполнять необходимые зрительные задачи. Они основаны на исследованиях, проведенных с лицами в возрасте 20 лет без каких-либо зрительных проблем со зрением. Тем не менее, на многих рабочих местах работают люди с различными зрительными системами [4].

Каллер и Веттерберг исследовали электроэнцефалограммы (ЭЭГ) людей в лаборатории, где создали условия офиса, первый раз с относительно высоким уровнем освещенности (1700 люкс), другой раз с относительно низким уровнем освещенности (450 лк). Анализ ЭЭГ демонстрирует ярко выраженную разницу: результаты при высоком уровне освещенности: меньшее количество дельта-волн (дельта активность ЭЭГ, являющейся

индикатором сонливости), означает, что яркий свет имеет предупредительное влияние на центральную нервную систему (рис. 12).

Многие исследования воздействия света на внимательность и настроение были проведены в условиях ночной смены, так как по расчетам результат должен проявляться сильнее. На рисунке 13 показаны влияние двух систем освещения на активность человека в зависимости от времени суток для вахтовых рабочих. Снижение активности к ночи происходит для обоих режимов, но система с высоким уровнем освещенности всегда приводит к значительному увеличению уровня активности и таким образом повышается внимательность и настроение.

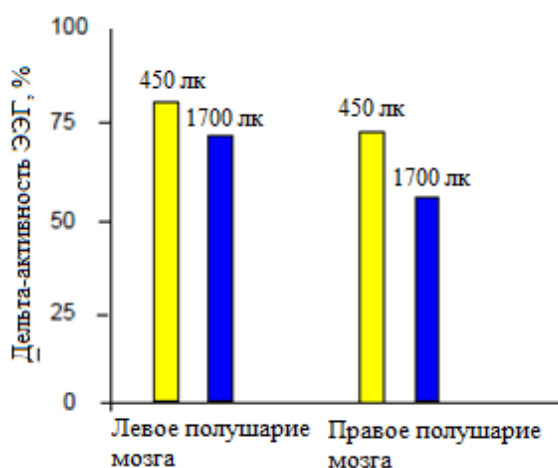


Рис. 12. Дельта активность ЭЭГ офисных работников при уровнях освещенности 450 люкс и 1700 лк.

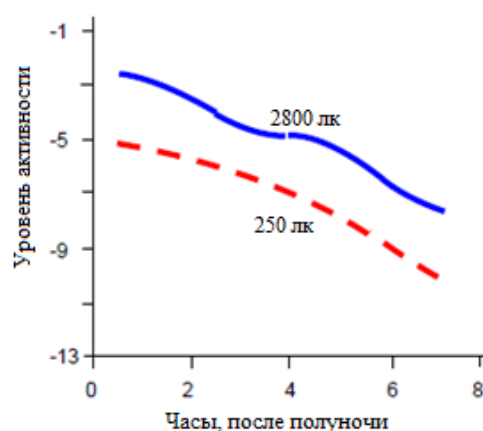


Рис. 13. Внимательность и настроение выражается в уровне активности при освещенности 250 лк и 2800 лк, в зависимости от рабочих часов после полуночи.

Другие исследования показывают, что более высокие уровни освещенности в помещении позволяют справиться с усталостью и приводит к тому, что человек становится более внимательным [5].

Исследования уровня стресса и жалоб людей, работающих в помещении, были сделаны путем сравнения группы людей, работающих только при искусственном освещении, с группой, работающей при комбинированном освещении искусственного и дневного света. Как видно на рисунке 14, в январе, когда дневного света недостаточно, чтобы внести существенный вклад в уровень освещенности, разница между результатами двух групп не значительна. Но в мае, когда дневной свет действительно вносит вклад, дневной свет оказывает благотворное влияние на группу и приводит к значительно более низкому уровню стрессов. Другое исследование показывает, что высокий уровень освещенности в помещениях зимой оказывает положительное влияние на настроение и энергичность людей.

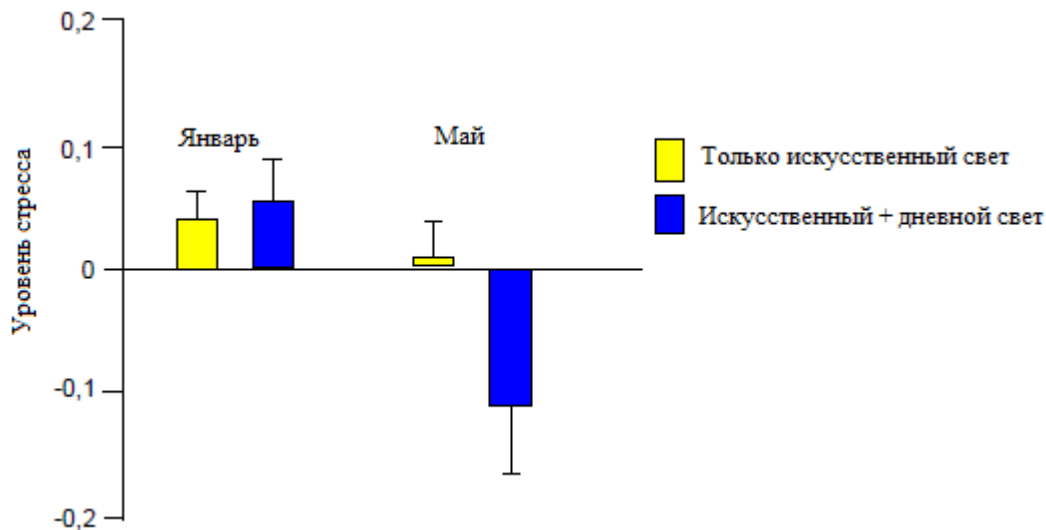


Рис. 14. Уровень жалоб на стресс (со статистическим разбросом) в группе работников, работающих либо только при искусственном освещении или при комбинированном освещении искусственного и дневного света [5].

### 1.5. Опасность синего света

В настоящее время практически все белые СД, выпускаемые самыми разными компаниями, имеют повышенное излучение в наиболее опасной для глаза спектральной полосе 440–460 нм.

Вопрос об опасности избыточного сине-голубого излучения остро встал в первой половине XX века в результате многочисленных световых ожогов сетчатки глаз морских лётчиков США. В середине 1970-х группой физиологов в экспериментах на обезьянах было показано, что различные пороги светового повреждения сетчатки в голубой области спектра (440–460 нм) в 50–100 раз ниже, чем для света основного зрительного диапазона 500–700 нм [20].

Реальные дозы повреждения человеческой сетчатки светом сине-голубого диапазона могут оказаться близкими к полученным в экспериментах на крысах-альбиносах: 3-часовое освещение при энергетической освещённости  $0,64 \text{ Вт/ м}^2$  в спектральной полосе 400–480 нм спустя 1–2 дня приводит к массовой, хотя и частично обратимой, гибели фоторецепторных клеток сетчатки [20]. Другими словами, было показано, что даже слабый свет фиолетово-сине-голубого диапазона потенциально опасен для зрения человека.

Повреждение сетчатки коротковолновым видимым излучением – медленная фотохимическая цепная реакция, результаты которой постепенно накапливаются в течение всей жизни. Одним из действующих начал фотохимического повреждения является липофусцин – фототоксичный пигмент старости, который из-за избирательного поглощения света в полосе 440–460 нм генерирует свободные радикалы, отравляющие пигментный эпителий сетчатки. Токсичные гранулы липофусцина постоянно и необратимо накапливаются в клетках пигментного эпителия сетчатки и являются одной из основных причин её возрастных заболеваний. Накопление липофусцина зависит от интегральной световой нагрузки на глаза, и уже к 10–20 -летнему возрасту количество липофусциновых гранул, ответственных

за степень фотоповреждения, достигает половины от накапливаемого значения в течение всей жизни человека.

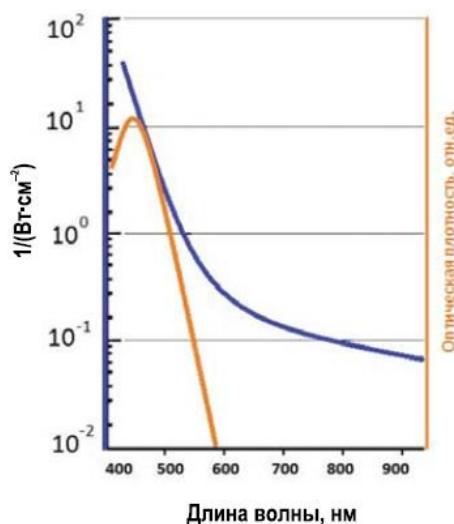


Рис. 15. Спектр действия фотоповреждения сетчатки обезьяны макака-резус при длительности световой экспозиции 1000 с (синяя линия) и относительный спектр поглощения фототоксичного пигмента старости липофусцина (оранжевая линия).

Множественная совокупность биологических и медицинских данных свидетельствует о том, что фототоксичные эффекты сине-голубого света являются кумулятивными и приводят к медленному необратимому падению зрительных функций [20].

Хрусталик является одним из естественных защитных механизмов глаза при воздействии коротковолнового излучения. Существенно, что хрусталики детей практически вдвое прозрачнее в сине-голубой области спектра, чем хрусталики взрослых людей (рис. 9). Соответственно, риск фотоповреждения детских глаз минимум вдвое выше, чем глаз взрослых людей.

С физиологической точки зрения центральная зона сетчатки, ответственная за остроту зрения и работу при чтении, вообще не нуждается в участии сине-голубой составляющей в освещении, так как сформирована без участия синечувствительных колбочек и является сине-слепой [20].

Основа успешного проектирования освещения — требования к количеству света, его спектру, распределению, времени и

продолжительности воздействия с целью обеспечить максимальную пользу для человека. Новые технологии и новые источники света должны учитывать новые стандарты и правила освещения.

В связи появлением на рынке нового типа источника – СД, появилась возможность создания энергоэффективного, безопасного для окружающей среды, компактного источника света с длительным сроком службы. Быстрый темп увеличения световой отдачи и усовершенствование методики отбора (биннирования) цветных СИД позволяют говорить о блестящей перспективе создания источника белого света на основе цветных кристаллов, более эффективного и удовлетворяющего необходимым качественным и количественным показателям для многочисленных осветительных установок [19].

#### 1.6. История создания светодиодов.

История светодиодов начинается в 1907 году, когда Г. Д. Раунд впервые заметил свечение карборунда (SiC). Но Г. Д. Раунд не смог объяснить процесса излучения [11]. В 1923 году О. В. Лосев сообщил об открытии явления электролюминесценции в полупроводниках. Он писал: «У кристаллов карборунда (полупрозрачных) можно наблюдать (в месте контакта) зеленоватое свечение при токе через контакт всего 0,4 мА... Светящийся детектор может быть пригоден в качестве светового реле как безынертный источник света».

К 1950-м годам полупроводниковые материалы типа  $A^{II}B^{VI}$ , а также SiC, были хорошо изучены, так как эти материалы встречаются в природе. Поэтому неслучайно, что первые светодиоды были изготовлены из этих материалов [11].

Положение дел существенно изменилось в начале 60-х годов, когда излучение полупроводниковых соединений типа  $A^{III}B^V$  привело к обнаружению интенсивного излучения в p – n-переходах из арсенида галлия (GaAs). Появились перспективы эффективного преобразования

электрической энергии в световую в различных областях спектра и широкого технического применения этого явления [12]. Поскольку полупроводниковые материалы данного типа созданы искусственно, их до этого времени просто не существовало [11].

Первый красный светодиод из GaAsP был создан в 1962 году Ником Холоньяком (Nick Holonyak) в компании General Electric. Монохромные красные светодиоды в 60-е гг. прошлого столетия применялись для производства небольших световых индикаторов, используемых в электронных приборах. Внешний квантовый выход (отношение числа излученных светодиодом фотонов к общему числу перенесенных через p-n-переход элементарных зарядов) таких светодиодов составлял не более 0,2%, а световой поток - всего 0,001 лм.

К 1976 году были получены оранжевые, желтые и желто-зеленые светодиоды, яркие настолько, что их можно было разглядеть и при солнечном свете. До 1985 года они использовались исключительно в качестве индикаторов, со световым потоком всего лишь 0,1лм. Все эти СД были созданы на основе арсенидов и фосфидов галлия, алюминия, индия и их смесей.

Эффективность светодиодов по световому потоку постоянно увеличивалась, и к 1990 г. световой поток красных, желтых и зеленых светодиодов достиг значения 1 люмен, и они уже стали применяться в качестве отдельных световых элементов, таких, например, как лампы в автомобилях.

Дальнейшее совершенствование светодиодов проходило по двум направлениям - увеличение внешнего квантового выхода и расширение спектра излучения. Велик вклад в эту работу российских учёных, в частности, Ж.И. Алферова с сотрудниками, ещё в 70-е годы разработавших так называемые многопроходные двойные гетероструктуры, позволившие значительно увеличить внешний квантовый выход. Использовались гетероструктуры на основе арсенидов галлия-алюминия, при этом был



достигнут внешний квантовый выход до 15% для красной части спектра (световая отдача до 10 лм/Вт) и более 30% - для инфракрасной [13].

Долгое время развитие светодиодов сдерживалось отсутствием приборов, излучающих в синем диапазоне. Попытки реализовать синие и зелёные светодиоды и лазеры были связаны с использованием кристаллов нитрида галлия GaN и селенида цинка ZnSe.

У светодиодов на основе SiC оказался слишком мал КПД и низок внешний квантовый выход излучения. У светодиодов на основе твёрдых растворов селенида цинка ZnSe квантовый выход был выше, но они перегревались из-за большого сопротивления и служили недолго. Оставалась надежда на нитриды.

Исследования свойств нитридов элементов группы III (AlN, GaN, InN) и их сплавов, представляющих собой широкозонные полупроводники с прямыми оптическими переходами, позволили прийти к выводу, что они являются наиболее перспективными материалами для изготовления свето- и лазерных диодов, излучающих во всей видимой и ультрафиолетовой (240...620 нм) областях спектра. Основной причиной, препятствовавшей получению высококачественных плёнок GaN, было отсутствие подходящих подложек, параметры решётки и коэффициент теплового расширения которых соответствовали бы GaN. Долгое время такие плёнки выращивали на сапфире (рассогласование решеток 13,5%), достоинствами которого являются лишь термическая стойкость и возможность очистки перед началом роста. Другая проблема – получение кристаллов p-типа. Первые работы в этом направлении были начаты ещё в 60-е годы XX века, однако все попытки надёжно внедрить элементы группы II (Mg, Zn, Be) как примеси замещения, которые бы действовали как акцепторы, завершились неудачей.

Ещё в 70-х годах группа Дж. Панкова (J. Pankove, RCA, Princtone, USA) из лаборатории компании IBM создала фиолетовые и голубые диоды на основе эпитаксиальных плёнок нитрида галлия (GaN) на сапфировой подложке. Квантовый выход был достаточен для практики (доли процента),

но срок их службы был ограничен. В р-области р-n-перехода концентрация дырок была мала, и сопротивление диодов из-за высокой концентрации дефектов оказалось слишком большим, они довольно быстро перегревались и выходили из строя. При этом Панкову так и не удалось осуществить легирование р-типа.

В начале 80-х годов Г.В. Сапарин и М.В. Чукичев в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова обнаружили, что после действия электронного пучка образец GaN, легированный Zn, становится ярким люминофором. Но причину яркого свечения – активацию акцепторов Zn под влиянием пучка электронов – тогда понять не удалось. Эту причину раскрыл И. Акасаки (I. Akasaki) из Нагойского университета. Из многих его достижений выделим два основных, сделанных в 80-е годы XX века. Он предложил включить между сапфиром и активным слоем буферный слой AlN, что отчасти снимало проблему несоответствия решёток, и уже в 1986 году получил пленки GaN высокого качества. А в 1989 году И. Акасаки вместе со своим аспирантом Аmano (H. Amano) впервые изготовили образец р-типа. Изучая под электронным микроскопом легированную Mg плёнку GaN, Акасаки и Аmano обнаружили свечение образца после бомбардировки электронами. Завершив электронно-микроскопические исследования, они установили, что образец приобрёл проводимость р-типа, и связали это с воздействием электронного пучка на плёнку, способствовавшим замещению атомов Ga атомами Mg. Авторы заявили патент на эффективное легирование GaN р-типа. К тому времени большинство исследователей прекратили работать с GaN, и сообщение Акасаки почти не привлекло внимания. Но эти работы не оставил без внимания Шуджи Накамура (Shuji Nakamura) из фирмы Nichia Chemical, который и совершил прорыв в изготовлении голубых светодиодов. Фирма Nichia запатентовала ключевые этапы технологии и к концу 1997 года выпускала уже 10 — 20 млн. голубых и зеленых светодиодов в месяц, а в январе 1998 года приступила к выпуску белых светодиодов[14].

В 2000–2005 гг. уровень светового потока светодиодов достиг значения 100 лм и выше. Появились белые светодиоды с теплыми и холодными оттенками. Постепенно светодиоды начали конкурировать с традиционными источниками света и стали применяться в театральном и сценическом освещении. В настоящее время светодиоды широко используются в различных системах общего освещения. По мнению Департамента энергетики (Department of Energy) и Ассоциации развития оптоэлектронной промышленности (Optoelectronics Industry Development Association), к 2025 г. светодиоды станут самым распространенным источником света в жилых домах и офисах[15].

### 1.7. Принцип работы и устройство СД

Светодиод – полупроводниковый диод, излучающий свет при прохождении тока через *p-n* – переход в прямом направлении.

С помощью легирования, материал *n*-типа обогащается отрицательными носителями заряда, а материал *p*-типа – положительными носителями заряда. Атомы в материале *n*-типа приобретают дополнительные электроны, а атомы в материале *p*-типа приобретают дырки – места на внешних электронных орбитах атомов, в которых отсутствуют электроны [15].

Работа светодиода основана на спонтанной рекомбинационной люминесценции избыточных носителей заряда, инжектируемых в активную область светодиода[17].

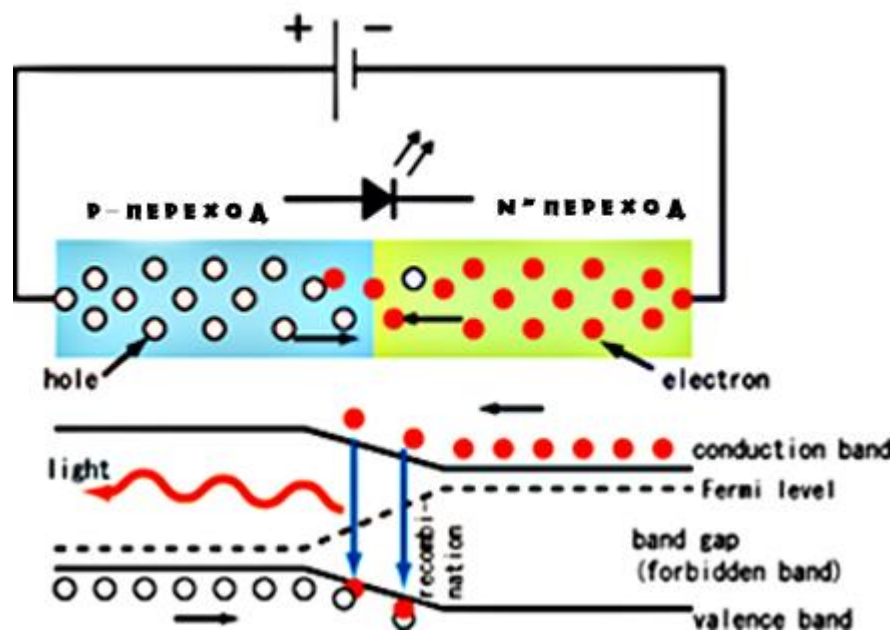


Рис. 16. Схема и энергетическая диаграмма p-n-перехода.

Все современные СД разрабатываются на основе гетеропереходов. Применение гетероструктур позволяет улучшить эффективность СД. Это происходит за счет ограничения носителей с помощью барьерных слоев в активной области, что увеличивает вероятность рекомбинации [11].

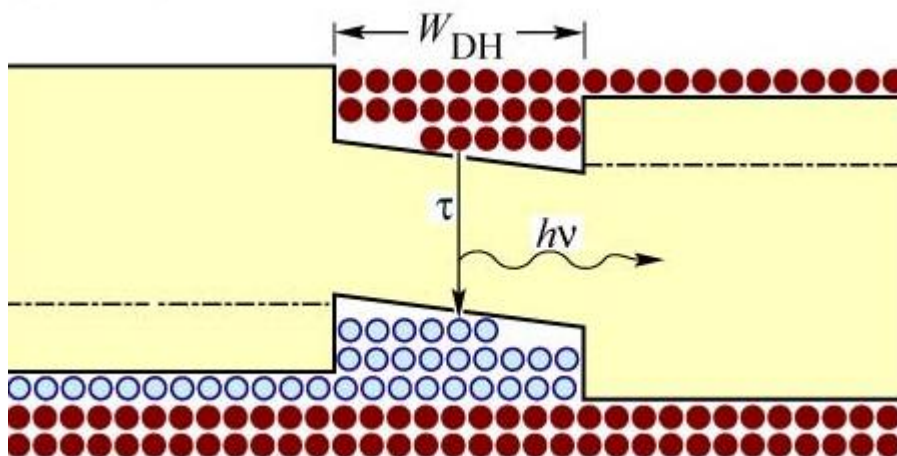


Рис. 17. Энергетическая диаграмма прямосмещённого p-n гетероперехода.

Чтобы кванты энергии – фотоны, освобожденные при рекомбинации, соответствовали квантам видимого света, ширина запрещенной зоны исходного полупроводника должна быть относительно большой ( $E_g > 1,8$  эВ). Исходя из этого ограничения, для изготовления светодиодов используются следующие полупроводниковые материалы: фосфид галлия (GaP), карбид

кремния (SiC), твердые растворы: галлий—мышьяк—фосфор (GaAsP) и галлий—мышьяк—алюминий (GaAsAl), а также нитрид галлия (GaN), который имеет наибольшую ширину запрещенной зоны ( $E_g > 3,4$  эВ), что позволяет получать излучение в коротковолновой части видимого спектра вплоть до фиолетового [17].

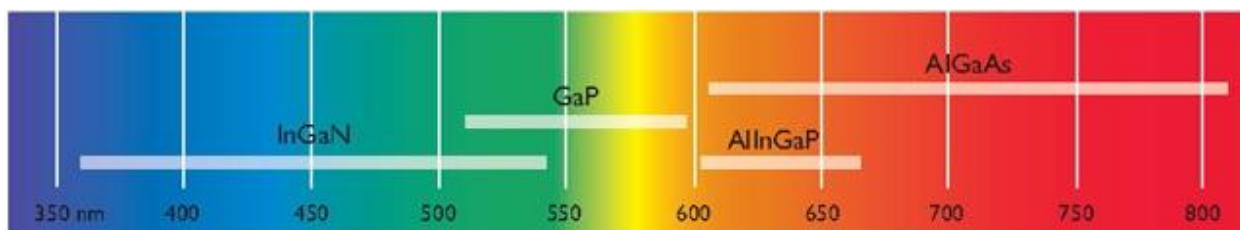


Рис.18. Схематическое изображение «охвата» видимого диапазона современными полупроводниковыми излучающими материалами.

Основные материалы для производства монохромных светодиодов. AlInGaP и InGaN покрывают почти весь спектр видимого излучения для светодиодов высокой интенсивности, кроме желто-зеленой и желтой областей спектра с длиной волны 550–585 нанометров (нм). Цвета, соответствующие этому диапазону длин волн, могут быть получены с помощью совместного использования зеленых и красных светодиодов [15].

СД состоит из полупроводникового кристалла на подложке, корпуса с контактными выводами и оптической системы.

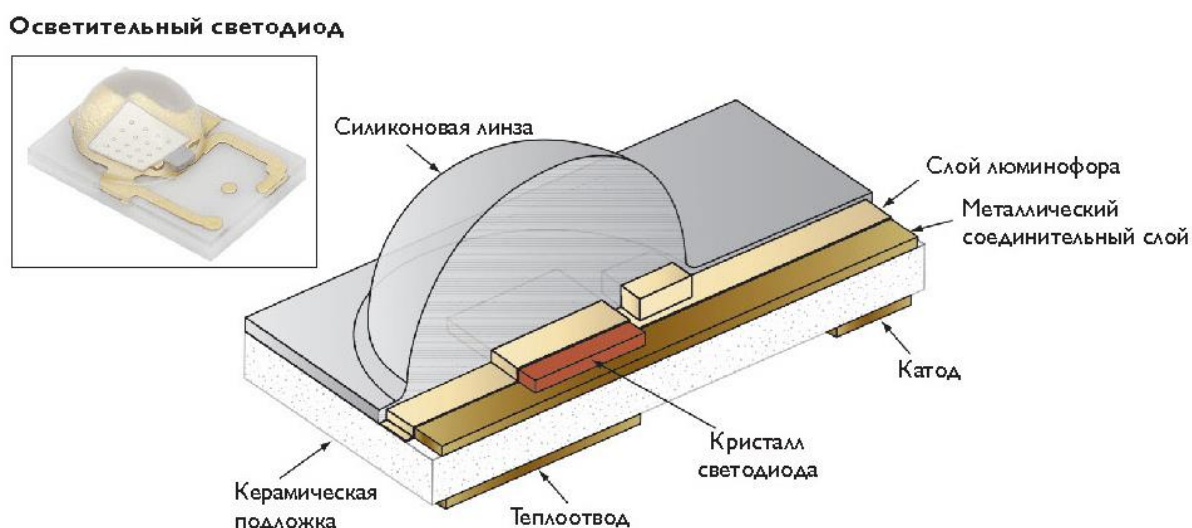
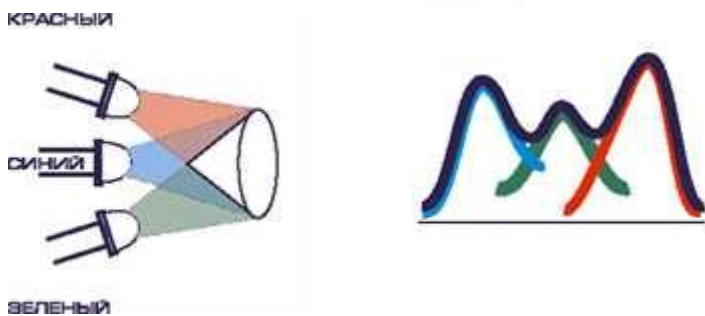


Рис.19. Конструкция светодиода Luxeon (Philips).

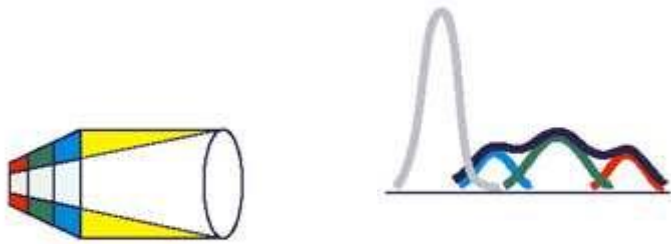
Светоизлучающий кристалл закреплён на теплоотводящей подложке (основе). При приложении прямого напряжения к р-n-переходу кристалла через катод и анод в нём генерируется излучение. Часть его не выходит из кристалла, так как в нём проходит перепоглощение, а другая, большая часть – через линзу выходит наружу. Кристалл, подложка и внутренние электроды залиты прозрачным полимером с максимально высоким коэффициентом преломления, образующим корпус СД. Купол корпуса выполняет функции линзы или рассеивателя, в зависимости от нужной кривой силы света (КСС) СД.

### 1.8. Способы создания белых светодиодов.

Существует три способа создания белых светодиодов. Первый — смешивание цветов по технологии RGB. На одной матрице плотно размещаются красные, голубые и зеленые светодиоды, излучение которых смешивается при помощи оптической системы, например линзы. В результате получается белый свет.



Второй способ заключается в смешении излучения трёх люминофоров (красного, зелёного и голубого), возбуждаемых ультрафиолетовым светодиодом. Этот способ использует принципы и люминофоры, хорошо разработанные в технологии люминесцентных ламп.



Третий способ - желто-зеленый или зеленый и красный люминофор наносятся на голубой светодиодах, так что два или три излучения смешиваются, образуя белый или близкий к белому свет.



У каждого способа есть свои достоинства и недостатки. Технология RGB в принципе позволяет не только получить белый цвет, но и перемещаться по цветовой диаграмме при изменении тока через разные светодиоды. Этим процессом можно управлять вручную или посредством программы, можно также получать различные цветовые температуры. Поэтому RGB-матрицы широко используются в светодинамических системах. Кроме того, большое количество светодиодов в матрице обеспечивает высокий суммарный световой поток и большую осевую силу света. Но из-за неравномерного отвода тепла с краев матрицы и из ее середины светодиоды нагреваются по-разному, и, соответственно, по-разному изменяется их цвет в процессе старения — суммарные цветовая температура и цвет «плывут» за время эксплуатации. Это неприятное явление достаточно сложно и дорого скомпенсировать.

Белые светодиоды с люминофорами существенно дешевле, чем светодиодные RGB-матрицы (в пересчете на единицу светового потока), и позволяют получить хороший белый цвет. Недостатки этого метода: во-

первых, у них меньше светоотдача, чем у RGB-матриц, из-за преобразования света в слое люминофора; во-вторых, достаточно трудно проконтролировать равномерность нанесения люминофора во время технологического процесса и, следовательно, цветовую температуру; и в-третьих — люминофор тоже стареет, причем быстрее, чем сам светодиод [18].

### 1.9. Характеристики СД.

С точки зрения светотехники СИД следует характеризовать следующими параметрами (техническими параметрами):

- доминирующая длина волны—  $\lambda_{dom}$ : длина волны монохроматического стимула при температуре окружающей среды 25 °С;
- пиковая длина волны -  $\lambda_p$ : длина волны в максимуме спектрального распределения;
- ширина спектра на уровне 0.5 от спектрального максимума излучения -  $\Delta\lambda_{0,5}$ ;
- световой поток –  $\Phi_v$ : величина, образуемая от лучистого потока  $\Phi_e$  при оценке излучения по его действию на стандартного фотометрического наблюдателя МКО.

Для дневного зрения

$$\Phi_v = K_{m} \int_{360}^{830} (d\Phi_e(\lambda) / d\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda$$

где  $d\Phi_e(\lambda) / d\lambda$  - спектральное распределение лучистого потока;

$V(\lambda)$  - относительная спектральная световая эффективность;

- световая отдача источника -  $\eta_v$ : Отношение излучаемого светового потока к мощности, потребляемой источником света;
- номинальное напряжение и номинальный ток светодиода -  $U_{rated}, I_{rated}$ : значение напряжения и тока для заданных условий эксплуатации;
- прямое направление тока -  $I_f$ : направление тока, при котором к контактной площадке области р-типа полупроводникового



светоизлучающего элемента приложен положительный потенциал относительно контактной площадки области n- типа.

- внутренний ( $\eta_{in}$ ) и внешний ( $\eta_{ex}$ ) квантовый выход кристаллов, а так же эффективность ОС ( $\eta_{OC}$ ).

Последний пункт в списке характеристик указывает на их изначальную принадлежность к излучательным кристаллам. Приведем расшифровку этих понятий.

Внутренний квантовый выход определяется как отношение числа излучённых p-n-переходом фотонов к числу инжектированных электронов, и зависит от качества материала, наличия в нём примесей и дефектов, а так же структуры и состава эпитаксиального слоя. Но из кристалла выходит не всё излучение – часть его поглощается в кристалле. Отношение числа вышедших из кристалла фотонов к числу инжектированных электронов – это внешний квантовый выход СИД. А коэффициент выхода оптической системы (ОС) – доля света, выходящего из кристалла и окружающей его оптической системы, зависит от коэффициента преломления, внутренней абсорбции и геометрии линзы. Общая эффективность СИД это произведение внешнего квантового выхода на эффективность выхода ОС. Три этих величины измеряются в процентах.

$$\eta = \eta_{кв} \cdot \eta_{OC}$$

К эксплуатационным характеристикам относятся:

- срок службы светодиода в зависимости от температуры активной области -  $t_{nLED}$ : время, за которое измеряемые световые параметры при температуре окружающей среды 25 °С и номинальном прямом токе составят не менее n % начальных значений.

- диапазон рабочей температуры -  $t_{op}$ : диапазон температуры окружающей среды, при котором СД или светодиодный модуль может работать в соответствии с установленным в спецификации.

- диапазон температуры хранения –  $t_{stg}$ : диапазон температуры окружающей среды, при котором допускается хранить неработающие СД,

светодиодные модули или светодиодные лампы при неизменности параметром, установленных в соответствующем стандарте или изготовителем, или ответственным поставщиком.

- наибольшая нормируемая температура–  $t_c$ : наибольшая допустимая температура на внешней поверхности светодиодного модуля (в указанном месте, если приведено в маркировке) при нормальных рабочих условиях и при номинальном напряжении/токе/мощности или при наибольшем значении из диапазона напряжения/тока/мощности [23].

#### Цветовые характеристики белых СД и факторы, влияющие на них.

Цветопередача и цветовая температура являются важными характеристиками для ИС, применяемых в ОУ.

Изначально, произведённые светодиодные кристаллы отличаются по своим характеристикам в некотором диапазоне. Вследствие несовершенств технологии производства они имеют различные значения длины волны максимума излучения -  $\lambda_d$ , ширины спектра излучения, светового потока –  $\Phi_v$ , прикладываемого прямого напряжения  $U_f$ . По этим параметрам они сортируются на группы и в пределах этой группы считаются одинаковыми. Важно понимать, что даже в пределах одной группы СИД отличаются по параметрам и характеристикам.

Таким образом при создании источника белого света с определенной Тцв на основе нескольких кристаллов, а также его последующий расчет (т.е. расчет соотношения яркостей цветных СИД для воспроизведения необходимой Тцв) может оказаться совершенно неверным из-за возможных начальных разбросов. Это может быть как разброс световых характеристик СИД ( $\lambda_p$ , потока светодиодов), так и электрических характеристик – тока через кристалл, ВАХ.

Вид спектральной плотности излучения СД зависит от температуры кристалла и величины протекающего через него тока. Наличие дефектов в полупроводниковом излучающем кристалле в свою очередь зависит от

технологии выращивания кристалла, от его материала и материала подложки, на которой он выращивается.

В многокристальном белом светодиодном ИС цветность излучения определяется пропорцией, в которой взяты излучения кристаллов. Это соотношение обеспечивается тем, что через каждый из кристаллов пропускается ток определённой величины. Он обеспечивается пускорегулирующей аппаратурой. Эта аппаратура имеет свои погрешности в обеспечении заданных характеристик. Также возможны колебания сети, что тоже может привести к изменению электрического режима работы ИС. Кроме того производимых по существующим на данный момент технологиям, всегда есть некий разброс по электрическим характеристикам – сопротивлению, прямому напряжению. Таким образом, несоответствие действительных электрических параметров расчётным приводит к тому, что соотношение излучений кристаллов может исказиться.

Целью данной работы является формулирование требований к осветительным приборам, на основе белых СИД, используемых в помещениях общего назначения с длительным пребыванием людей, с учетом влияния психо-физиологических процессов в организме человека и параметров и характеристик СИД на количественные и качественные показатели светодинамических ИС.

Для этого необходимо решить ряд задач:

- исследовать спектры современных реальных СИД;
- выбрать оптимальные  $\lambda_{\text{dom}}$ ;
- рассмотреть влияние отклонения  $\lambda_{\text{dom}}$  излучения кристаллов и определить требования к их воспроизводимости при изготовлении;
- оценить воспроизводимость белых многокристальных СИД;
- оценить биологическую эффективность белых многокристальных СИД;
- исследовать связь спектрального состава белых многокристальных СИД и циркадных ритмов;

- оценить возможность создания светодиодных источников белого света с возможностью их последующего использования в светодинамических установках в помещениях с длительным пребыванием людей разного возраста.

## **2. Расчётная и аналитическая часть**

### **2.1. Методы оценки цветопередачи СД**

Цветопередача и цветовая температура являются важными характеристиками для ИС, применяемых в ОУ.

Под цветовой передачей источника света принято понимать способность источника света передавать цвета различных объектов в сравнении с идеальным источником света. Этот параметр является количественным показателем качества воспроизведения цветовых оттенков по шкале от 0 до 100. По определению, индекс цветопередачи ламп накаливания или солнечного света равен 100.

Значение индекса цветопередачи в диапазоне 90-100 требуется в торговых и производственных помещениях, в которых точная цветопередача является критично важной – например, в магазинах по продаже тканей, произведений искусства или в художественных галереях. Для большинства офисных, торговых, общеобразовательных, медицинских и других рабочих и жилых помещений индекс цветовой передачи должен быть не менее 70-90. В производственных, охранных, и складских помещениях, где точная цветовая передача не имеет большого значения, могут использоваться источники света с минимальным значением цветовой передачи, равным 50 [19].

В настоящее время существует два активно используемых метода нахождения общего индекса цветовой передачи – это метод CRI (Ra) и CQS МКО. Рассмотрим каждый из существующих методов.

### 2.1.1. Метод оценки цветовой передачи CRI

В данном методе цветовая передача рассчитывается как усредненная характеристика по 8 основным образцам средней насыщенности и 6 дополнительным специальным образцам на цветах с бóльшей насыщенностью – красном, желтом, зеленом и синем, а также на образцах, воспроизводящих цвет человеческой кожи и зеленой листвы [25]. Контрольные образцы (их общее количество 14) имеют фиксированные значения спектральных коэффициентов яркости.

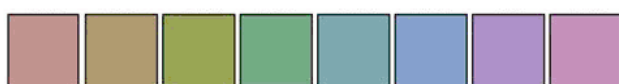


Рис. 20. Образцы (основные), используемые в методе CRI.

Оценка цветопередачи источника света опирается на эталонный источник (источник сравнения), который может быть задан математически. Эталонные источники определены как: чёрное тело для ИС с коррелированной Тцв ниже 5000 К, один из стандартных спектральных составов фаз дневного света для Тцв выше 5000 К.

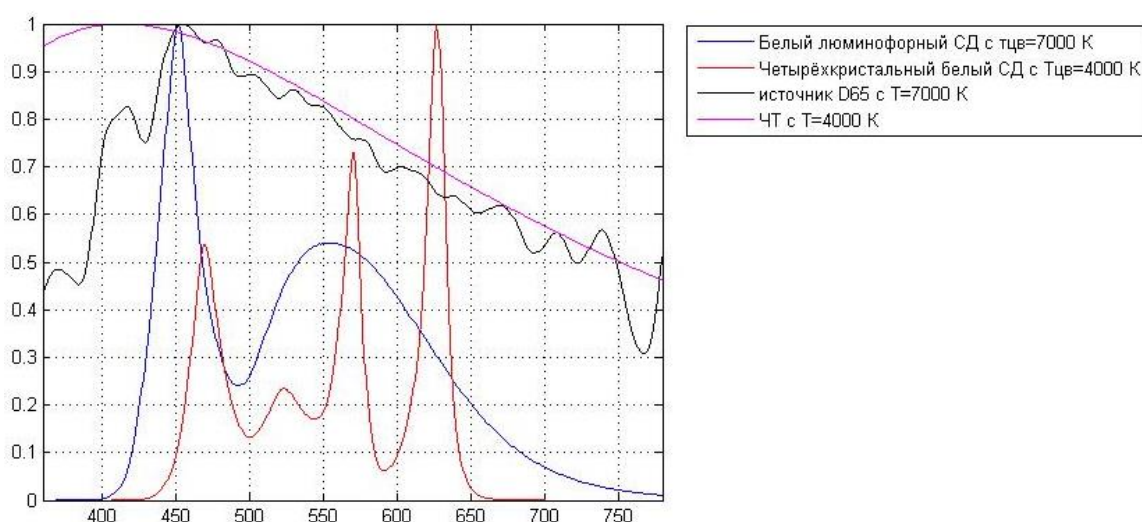


Рис. 21. Спектры белых СД и соответствующих им эталонных ИС.

У данного метода существует ряд определенных недостатков:

- Результат расчёта индекса цветопередачи сильно зависит от соответствия вида спектрального состава исследуемого ИС спектральному составу эталонного ИС, поэтому расчёт, выполненный для СИД, спектр которого состоит из одной или нескольких узких полос ( $\Delta\lambda_{0,5}=15-50$  нм) при эталонном источнике – чёрном теле со сплошным спектром, даст результаты, не соответствующие действительности. Подтверждение этому факту находятся в многочисленных научных работах, проведённых в последние годы.

- Цветность эталонного источника должна быть той же или почти той же, что и у исследуемой лампы, различие цветностей  $\Delta C$  должно быть не больше чем  $5,4 \cdot 10^{-3} (\Delta C = [(u_k - u_r)^2 + (v_k - v_r)^2]^{1/2})$ . А для многих СД и соответствующих им эталонных источников это условие не выполняется. Если величина  $\Delta C$  превышает указанное значение, это значит что результаты таких расчётов не могут считаться достоверными.

- Наличие четкой границы выбора эталонного источника – 5000 К, в результате которой получается «скол» вычисленных значений  $R_a$ .

- Если рассчитанный  $R_a$  велик, то вполне может оказаться, что насыщенные цвета ИС передаёт плохо. Это происходит из-за того, что для оценки используется слишком мало образцов и все они имеют слишком маленькую насыщенность [26].

- Некоторые частные индексы цветовой передачи могут иметь отрицательные значения.

- Общий индекс цветовой передачи определяется как среднее арифметическое первых восьми частных индексов цветовой передачи, а это значит, что если некоторые частные индексы цветовой передачи имеют малые значения, а остальные – достаточно большие, то возможен вариант вычисления высокого значения  $R_a$ .

### 2.1.2. Метод шкалы цветности или CQS

Данный метод был предложен Y. Ohno и W. Davis (National Institute of Standards and Technology) и представляет собой модификацию стандартного метода CRI. Основные отличия от общепринятого классического метода МКО:

1. Используется 15 тестовых образцов;
2. Расчет цветовых различий в CIELAB;
3. Цветовое различие определяется как среднее геометрическое среди 15 образцов.



Рис.22. Образцы, используемые в методе CQS.

В настоящий момент для расчёта цветовых различий МКО рекомендует систему  $L^*a^*b^*$ . В этом пространстве светлота (lightness) задана координатой  $L^*$ , которая изменяется от 0 до 100, хроматическая составляющая – двумя полярными координатами  $a^*$  и  $b^*$ . Первая обозначает положение цвета в диапазоне от зелёного до пурпурного, вторая – от синего до жёлтого.

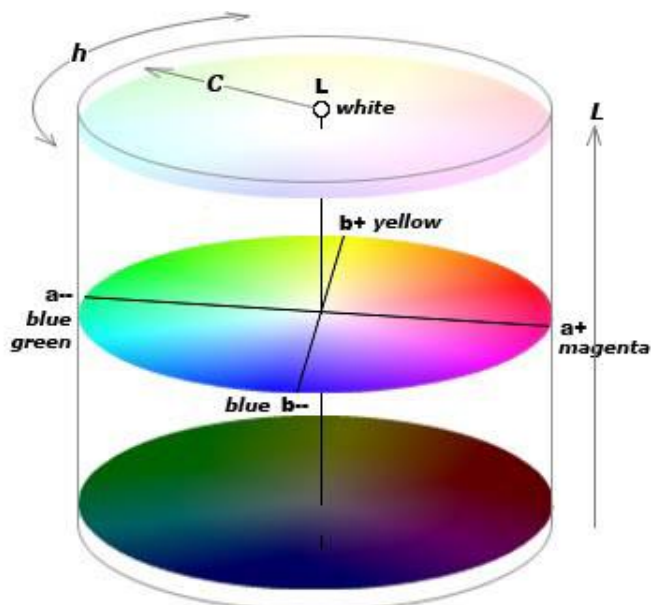


Рис. 23. Схематическое изображение пространства  $L^*a^*b^*$



Данный метод позволяет более объективно оценить цветопередачу СД,  
т.к.:

1. Новые тестовые отражающие образцы из атласа Манселла имеют большую цветовую насыщенность;

2. Общий индекс цветовой передачи, рассчитанный по этому методу, определяется как среднее геометрическое всех частных индексов цветовой передачи, а это значит что вклад каждого частного индекса  $R_{CQS_i}$  сказывается больше, поэтому оценка общего  $R_{CQS}$  объективнее;

3. Использование системы CIELAB позволяет исключить завышенные значения в красной области и заниженные в синей и желтой областях.

## 2.2. Функция относительной спектральной циркадной эффективности

Эффективность оптического излучения в управлении циркадной ритмикой организма во многом определяется его спектральным составом и характеризуется зависимостью степени подавления секреции мелатонина от длины волны излучения  $\lambda$ , выражаемой функцией относительной спектральной циркадной эффективности  $c(\lambda)$ .

Моделирование функции относительной спектральной циркадной эффективности выполняется по одному из двух вариантов, полученные в независимых экспериментальных исследованиях [27, 28] соответственно [29].

1)

$$c(\lambda) = 72,56 \frac{1}{28,99\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\lambda - 445)^2}{2 \cdot 28,99^2}\right) + \\ + 25,89 \frac{1}{21,21\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\lambda - 509)^2}{2 \cdot 21,21^2}\right)$$

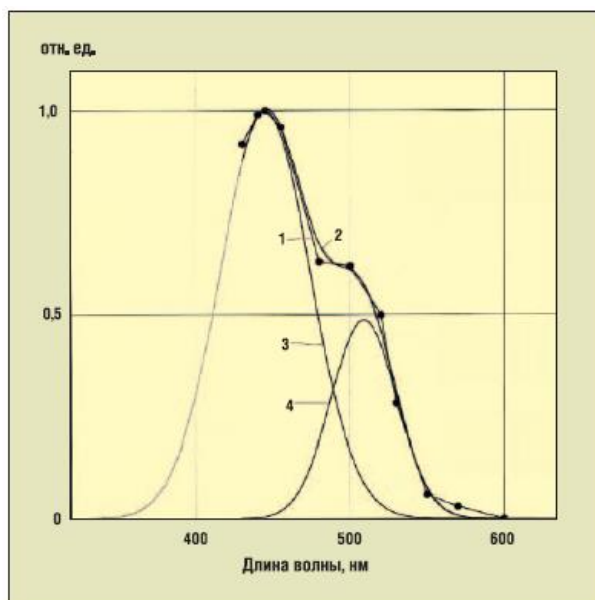


Рис.24. Графики: 1 – функции относительной спектральной циркадной эффективности  $c(\lambda)$ ; 2 – аппроксимирующего  $c(\lambda)$  выражения (1); 3 и 4 – первых и вторых членов выражения (1) соответственно.

2)

$$c(\lambda) = 77,88 \frac{1}{31,11\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\lambda - 445)^2}{2 \cdot 31,11^2}\right) +$$

$$+ 19,87 \frac{1}{23,33\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\lambda - 513)^2}{2 \cdot 23,33^2}\right)$$

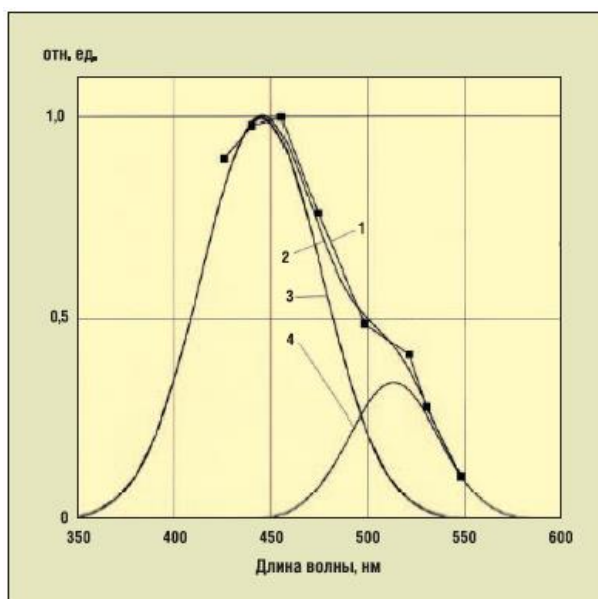


Рис.25. Графики: 1 – функции относительной спектральной циркадной эффективности  $c(\lambda)$ ; 2 – аппроксимирующего  $c(\lambda)$  выражения (2); 3 и 4 – первых и вторых членов выражения (2) соответственно.

Из графиков можно увидеть, что выражение (1) более точно аппроксимирует значения в коротковолновой части спектра, и вносит погрешность в диапазоне длин волн 550-600 нм. Но, в этом диапазоне функции относительной спектральной циркадной эффективности убывает и стремится в ноль. В то же время, выражение (2) наоборот полностью совпадает с экспериментальными точками в длинноволновой части спектра, но расходится в коротковолновой части спектра, в частности в максимуме  $s(\lambda)$ .

В связи с этим, в расчетах в качестве функции относительной спектральной циркадной эффективности  $s(\lambda)$  мы будем использовать аппроксимацию по выражению (1).

### 2.3. Программа

Исследование возможности получения белого многокристального светодиода проводилось на основе следующих данных [31, 32].

Таблица 1. Характеристики современных мощных цветных СД.

№ п/п	Серия	Цвет	Материал	$\lambda_p$ , нм	$\sigma_1$ , нм	$\sigma_2$ , нм	$\eta_v$ , лм/Вт	If, мА
1	Nichia	Green	InGaN	522	14	19	18.8	20
2		Red	InGaN	625	10	6	11.8	20
3		Blue	InGaN	471	10	10	4.3	20
4		Green	InGaN	525	16	19	27.6	20
5		Blue	InGaN	475	10	10	8.4	20
6		Amber	InGaN	600	46	69	16.2	20

№ п/п	Серия	Цвет	Материал	$\lambda_p$ , нм	$\sigma_1$ , нм	$\sigma_2$ , нм	$\eta_v$ , лм/Вт	If, мА
8	Osram Platinum DRAGON	Red	InGaAlP	632	9	9	51.7	700
9		Amber	InGaAlP	624	9	9	59.8	700
10		Yellow	InGaAlP	597	9	9	44.8	700
11		Deep Blue	GaN	449	10	10	28.7%	700
12		Blue	GaN	465	10	10	18.6	700
13		True Green	GaN	520	15	20	50.5	700
14		Verde	GaN	503	14	16	38.5	700
15	Osram OSOLON Black	Amber	InGaAlP	624	9	9	67.5	350
16		Red	InGaAlP	632	11	8	51.8	350
17		Yellow	InGaAlP	597	9	9	49.5	350
18		True Green	GaN	520	15	20	52.8	350
19		Deep Blue	GaN	449	10	10	31%	350

Так как характеристики ОП, созданные на основе трехкристалльных СИД существенно подвержены влиянию изменения  $\lambda_p$  и  $\Delta\lambda_{0,5}$ , связанные с условиями эксплуатации в процессе работы ИС [30], расчет будет проводиться для ОП, созданного на основе четырехкристалльных СИД.

### 2.3.1. Моделирование спектров цветных СИД

Для моделирования цветовых характеристик белых СИД, в основе которых лежит RGB - матрица, необходимым шагом является выбор аппроксимации, достаточным образом удовлетворяющей минимальной погрешности различия спектров для выполнения последующих цветовых расчетов.

Моделирование спектров может производиться по одному из двух методов:

1) Аппроксимация по рекомендации МКО 1997 года (СIE 107):

$$\Phi_{e,\lambda}(\lambda, \lambda_0, \Delta\lambda_{0.5}) = \frac{g(\lambda, \lambda_0, \Delta\lambda_{0.5}) + 2 \cdot g^5(\lambda, \lambda_0, \Delta\lambda_{0.5})}{3}, \text{ где}$$
$$g(\lambda, \lambda_0, \Delta\lambda_{0.5}) = \exp\left[-\left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda_{0.5}}\right)^2\right]$$

$\lambda_0$  - длина волны соответствующая пиковой длине волны,

$\lambda$  - текущая длина волны,

$\Delta\lambda_{0.5}$  – ширина спектра излучения на уровне 0.5 от спектрального максимума излучения.

2) Аппроксимация нормальным распределением:

$$\Phi_{e,\lambda}(\lambda, \lambda_0, \sigma_1, \sigma_2) = \frac{1}{\frac{\exp\left(\frac{\lambda - \lambda_0}{2\sigma_1^2}\right)}{\sigma_1\sqrt{2\pi}} + \frac{\exp\left(\frac{\lambda_0 - \lambda}{2\sigma_2^2}\right)}{\sigma_2\sqrt{2\pi}}}, \text{ где}$$

$\lambda_0$  - длина волны соответствующая пиковой длине волны,

$\lambda$  - текущая длина волны,

$\sigma_1, \sigma_2$  – отвечают за ширину спектра излучения (в случае симметричной функции равны)

Несомненным плюсом метода аппроксимации нормальным распределением является то, что он позволяет учесть асимметричность спектра СД.

### 2.3.2. Определение спектра белого четырёхкристального СД с заданной цветностью

- 1) Задаются спектры трёх кристаллов (в относительных единицах).
- 2) Спектр чёрного тела при заданной температуре находится по формуле Планка. Рассчитываются его координаты цвета  $X_{\text{чт}}$ ,  $Y_{\text{чт}}$ ,  $Z_{\text{чт}}$ .
- 3) Находятся координаты цвета излучений кристаллов.
- 4) Уравнение составляется следующим образом:

$$M1 = \begin{pmatrix} X1 & X2 & X3 \\ Y1 & Y2 & Y3 \\ Z1 & Z2 & Z3 \end{pmatrix} - \text{матрица из координат цвета излучений СД}$$

$m1 = M1^{-1}$  - обратная ей матрица

$$\begin{aligned} Xst &= X4 \cdot a \\ Mst &= Yst - Y4 \cdot a \\ Zst &= Z4 \cdot a \end{aligned}$$

Уравнение:

$abc = m1 \cdot Mst$ , где abc-матрица из трёх значений

$$abc = \begin{pmatrix} b1 \\ b2 \\ b3 \end{pmatrix} - \text{матрица яркостей каждого из СД, которые они должны}$$

иметь, чтобы суммарное излучение имело такие же координаты цвета как и чёрное тело при данной температуре. А для четвёртого кристалла таким множителем будет «а».

Суммарный спектр:

$$F_{e,\lambda \text{ itog}}(\lambda) = F_{e,\lambda 1}(\lambda) * b1 + F_{e,\lambda 2}(\lambda) * b2 + F_{e,\lambda 3}(\lambda) * b3$$

В результате получаем набор вариантов пропорций излучений цветных СД (для разных значений «а»), которые создают белое излучение с одной и той же цветностью, но с разной цветопередачей.

Выбор пропорции, обеспечивающей наилучшую цветопередачу белого СД при оптимальное сочетание всех частных индексов цветопередачи.

### 2.3.3. Расчёт световой отдачи белых СД

Световая отдача белого СД определяется световыми отдачами цветных СД и их энергетическими долями в суммарном излучении и рассчитывается по следующей формуле:

$$h_v = \frac{c_1 h_{v1} + c_2 h_{v2} + c_3 h_{v3} + c_4 h_{v4}}{c_1 + c_2 + c_3 + c_4}, \text{ где}$$

$h_{v1}, h_{v2}, h_{v3}, h_{v4}$  - их световые отдачи (лм/Вт)

$c_1, c_2, c_3, c_4$  – энергетические доли отдельных кристаллов в суммарном излучении, определяемые как

$$c_1 = 1$$

$$c_2 = \frac{b_2}{b_1} \cdot \frac{\lambda_{dom1}}{\lambda_{dom2}}$$

$$c_3 = \frac{b_3}{b_1} \cdot \frac{\lambda_{dom1}}{\lambda_{dom3}}$$

$$c_4 = \frac{b_4}{b_1} \cdot \frac{\lambda_{dom1}}{\lambda_{dom4}}$$

$b_1, b_2, b_3, b_4$  – коэффициенты пропорции соотношения излучений цветных СД.

### 2.3.4. Расчёт биологической эффективности излучения

Для определения биологического воздействия источников света воспользуемся коэффициентом, определяемым по следующей формуле:

$$a_{bv} = \frac{\int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda}(\lambda) c(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda},$$

где  $\Phi_{e\lambda}(\lambda)$  - спектральная плотность потока излучения;

$c(\lambda)$  - относительная спектральная циркадная эффективность;

$V(\lambda)$  - относительная спектральная световая эффективность.

Величина  $a_{bv}$  характеризует долю излучения, оказывающего биологическое действие, по отношению к излучению, обеспечивающему визуальные (зрительные) функции. Зная значение  $a_{bv}$ , проектировщик может

целенаправленно выбирать различные источники света и управлять осветительной установкой так, чтобы искусственное освещение оказывало положительное влияние на состояние человека в течение рабочего времени, в том числе в темное время суток [8].

### 2.3.5. Расчёт цветопередачи белого ИС методом CRI

Расчёт индексов цветопередачи производился по методу МКО 1974 года с учетом адаптации.

Основные этапы метода:

1) Выбирается стандартный источник излучения с известным спектром  $\Phi_{ст}(\lambda)$  (наиболее близкий по цветности излучения к исследуемому) и цветовыми координатами  $(x_{ст}, y_{ст})$ . Для цветовых температур ниже 5000 К рекомендуемый источник – абсолютно черное тело, спектр которого описывается формулой Планка. Если цветовая температура исследуемого излучения выше 5000 К, то в качестве стандартного рассматривается источник D, воспроизводящий фазы дневного света.

2) Определяется коэффициент K. Исходные спектры  $\Phi_{иссл}(\lambda)$  и  $\Phi_{ст}(\lambda)$  нормируются с помощью этих коэффициентов так, чтобы выполнялись условия  $Y_{иссл} = Y_{ст} = 100$ .

$$K = \frac{100}{\int_{380}^{780} F_{e,\lambda}(\lambda) \cdot y_{уд}(\lambda) d\lambda}$$

3) Вычисляются координаты цветности  $(x_{иссл}, y_{иссл})$  и  $(x_{ст}, y_{ст})$

Координаты цвета:

$$X = K \cdot \int_{380}^{780} F_{e,\lambda}(\lambda) \cdot x_{уд}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = K \cdot \int_{380}^{780} F_{e,\lambda}(\lambda) \cdot y_{уд}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = K \cdot \int_{380}^{780} F_{e,\lambda}(\lambda) \cdot z_{уд}(\lambda) d\lambda$$



Координаты цветности:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z}$$

4) Находятся спектральная плотность излучения отражённого от каждого из 15 образцов ( $i = 1, \dots, 15$ ) при освещении их стандартным и исследуемым источником:  $F_{e, \lambda_{\text{иссл}i}}(\lambda)$  и  $F_{e, \lambda_{\text{ст}i}}(\lambda)$ , и вычисляются координаты цветности ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) и цвета ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) отражённых излучений.

$$F_{e, \lambda_{\text{иссл}i}}(\lambda) = F_{e, \lambda_{\text{иссл}}}(\lambda) \cdot r_i(\lambda)$$

$$F_{e, \lambda_{\text{стан}i}}(\lambda) = F_{e, \lambda_{\text{стан}}}(\lambda) \cdot r_i(\lambda)$$

$$X_{\text{ст}i} = K \cdot \int_{380}^{780} F_{e, \lambda_{\text{ст}i}}(\lambda) \cdot x_{\text{уд}}(\lambda) d\lambda \quad X_{\text{иссл}i} = K \cdot \int_{380}^{780} F_{e, \lambda_{\text{иссл}i}}(\lambda) \cdot x_{\text{уд}}(\lambda) d\lambda$$

$$Y_{\text{ст}i} = K \cdot \int_{380}^{780} F_{e, \lambda_{\text{ст}i}}(\lambda) \cdot y_{\text{уд}}(\lambda) d\lambda \quad Y_{\text{иссл}i} = K \cdot \int_{380}^{780} F_{e, \lambda_{\text{иссл}i}}(\lambda) \cdot y_{\text{уд}}(\lambda) d\lambda$$

$$Z_{\text{ст}i} = K \cdot \int_{380}^{780} F_{e, \lambda_{\text{ст}i}}(\lambda) \cdot z_{\text{уд}}(\lambda) d\lambda \quad Z_{\text{иссл}i} = K \cdot \int_{380}^{780} F_{e, \lambda_{\text{иссл}i}}(\lambda) \cdot z_{\text{уд}}(\lambda) d\lambda$$

5) Все координаты цветности (МКО 1931) пересчитываются в координаты цветности  $U^*V^*W^*$ : ( $u_{\text{иссл}}, v_{\text{иссл}}$ ), ( $u_{\text{иссл}i}, v_{\text{иссл}i}$ ), ( $u_{\text{ст}}, v_{\text{ст}}$ ), ( $u_{\text{ст}i}, v_{\text{ст}i}$ ) по равноконтрастной цветовой диаграмме (МКО 1960) по формулам:

$$u = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}$$

$$v = \frac{9y}{-2x + 12y + 3}$$

6) Так как цветность исследуемого источника света, как правило, не точно совпадает с цветностью подобранного для сравнения стандартного излучения, то приходится вводить в расчеты поправку на изменение адаптации. Если этого не сделать, то различие в цветности и спектральных составах сравниваемых источников света внесет значительную

систематическую ошибку в расчет изменения цветности контрольных образцов, которая ухудшит расчетные качественные показатели исследуемого излучения.

Учет адаптации производится расчетным путем на основе метода коэффициентов фон Криса.

$$u'_{ui} = \frac{10.872 + 0.404c_{ui}c_{cm} / c_u - 4d_{ui}d_{cm} / d_u}{16.518 + 1.481c_{ui}c_{cm} / c_u - d_{ui}d_{cm} / d_u}$$

$$v'_{ui} = \frac{5.520}{16.518 + 1.481c_{ui}c_{cm} / c_u - d_{ui}d_{cm} / d_u}$$

Значения  $c$  и  $d$  вычисляются по формулам:

$$c = \frac{4 - u - 10v}{v}$$

$$d = \frac{1.708v + 0.404 - 1.1481u}{v}$$

7) В равноконтрастной системе ( $U^*V^*W^*$ ) рассчитываются координаты цвета отражающих образцов, освещённых стандартным и исследуемым источниками. Расчёт проводится по следующим формулам для стандартного и исследуемого источников света:

$$\left. \begin{array}{l} W_{cmi}^* = 25(Y_{cmi})^{1/3} - 17 \\ U_{cmi}^* = 13W_{cmi}^* (u_{cmi} - u_{cm}) \\ V_{cmi}^* = 13W_{cmi}^* (v_{cmi} - v_{cm}) \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} W_{ui}^* = 25(Y_{ui})^{1/3} - 17 \\ U_{ui}^* = 13W_{cmi}^* (u'_{ui} - u_u) \\ V_{ui}^* = 13W_{ui}^* (v'_{ui} - v_u) \end{array} \right\}, \text{ где}$$

$i$  – номер отражающего образца.

8) Определение изменения цвета каждого контрольного образца осуществляется по формуле цветового различия МКО. Согласно этой формуле цветовое различие можно интерпретировать в равноконтрастном пространстве МКО 1964 как расстояние между двумя точками, характеризующими сравниваемые цвета. Это изменение цвета, называемое в методе оценки цветопередачи цветовым сдвигом, определяется следующим уравнением:

$\Delta E_i = \sqrt{(U_{cmi}^* - U_{ui}^*)^2 + (V_{cmi}^* - V_{ui}^*)^2 + (W_{cmi}^* - W_{ui}^*)^2}$ , где  $\Delta E_i$  - цветовой сдвиг для  $i$ -того образца

9) Специальный индекс цветопередачи  $R_i$  для  $i$ -того образца связан с цветовым сдвигом следующей линейной зависимостью:

$$R_i = 100 - 4.6\Delta E_i$$

10) Наконец, общий индекс цветопередачи  $R_a$ , получается усреднением отдельных индексов цветопередачи:

$$R_a = (\sum R_i) / 8$$

Оценка цветопередачи источника дополняется специальными индексами цветопередачи, относящимися к шести стандартным дополнительным образцам ( $i = 9 \dots 14$ ), определённым как ярко-красный, ярко-жёлтый, ярко-зелёный, лёгкий желтовато-розовый и средний оливково-зелёный.

### 2.3.6. Расчёт цветопередачи белого ИС методом CQS

Последовательность расчёта:

Пункты 1) -4) выполняются аналогично расчету методом CRI.

5) В системе  $L^*a^*b^*$  рассчитываются координаты цвета всех контрольных образцов при освещении их стандартным и исследуемым источником света.

Расчёт проводится по следующим формулам для стандартного и исследуемого источников света:

$$\left. \begin{aligned} L_{cmi}^* &= 116(Y_{cmi} / Y_{cm})^{1/3} - 16 \\ a_{cmi}^* &= 500 \left[ (X_{cmi} / X_{cm})^{1/3} - (Y_{cmi} / Y_{cm})^{1/3} \right] \\ b_{cmi}^* &= 200 \left[ (Y_{cmi} / Y_{cm})^{1/3} - (Z_{cmi} / Z_{cm})^{1/3} \right] \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} L_{иссл\ i}^* &= 116(Y_{иссл\ i} / Y_{см})^{1/3} - 16 \\ a_{иссл\ i}^* &= 500 \left[ (X_{иссл\ i} / X_{см})^{1/3} - (Y_{иссл\ i} / Y_{см})^{1/3} \right] \\ b_{иссл\ i}^* &= 200 \left[ (Y_{иссл\ i} / Y_{см})^{1/3} - (Z_{иссл\ i} / Z_{см})^{1/3} \right] \end{aligned} \right\}, \text{ где}$$

$i$  – номер отражающего образца.

6) Определение изменения цвета каждого контрольного образца осуществляется по формуле цветового различия, которое определяется как среднее геометрическое между различиями в трёх координатах цвета:

$\Delta E_i = \sqrt{(L_{cmi}^* - L_{ui}^*)^2 + (a_{cmi}^* - a_{ui}^*)^2 + (b_{cmi}^* - b_{ui}^*)^2}$ , где  $\Delta E_i$  - цветовой сдвиг для  $i$ -того образца.

7) Среднее геометрическое между всеми 15-ю цветовыми различиями:

$$\Delta E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} \Delta E_i^2}$$

8) Индекс шкалы цветности определяется как:

$$R_a = 100 - 2.81 \Delta E_{RMS}$$

Коэффициент 2.81, согласно методу, был выбран таким образом, чтобы среднее значение индекса шкалы цветности для стандартной ЛЛ МКО было равно среднему значению индекса цветопередачи для такой лампы – 75.1.

9) Чтобы исключить отрицательные значения и привести шкалу к диапазону 0-100 применяется следующее преобразование:

$$R_{out} = 10 \cdot \ln[\exp(R_{in} / 10) + 1], \text{ где}$$

$R_{in}$  – исходное значение (может быть отрицательным)

$R_{out}$  – окончательное значение, результат преобразования.

### 2.3.7. Влияние возраста человека на восприятие им излучения белого СД

Старение человеческого глаза связано с уменьшением коэффициента пропускания хрусталика глаза в результате его фото - биологического старения. При старении наблюдателя существенная часть синего спектра отрезается хрусталиком [35]. Для оценки влияния возраста на восприятие света людьми разных возрастных групп введем интегральный коэффициент  $t$ :

$$t = \frac{\int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda}(\lambda)V(\lambda)\tau(\lambda)d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda}(\lambda)V(\lambda)d\lambda}, \text{ где}$$

$\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$  - спектральная плотность энергетического потока белого многокристального СД,

$V(\lambda)$  - относительная спектральная световая эффективность,

$\tau(\lambda)$  - коэффициент пропускания хрусталика (рис. 10).

### 3. Результаты расчётов

На основе данных, приведенных в таблице 1, в каждой группе были отобраны 4 цветных светодиода, которые обеспечили наилучшую из возможных цветопередачу.

Зависимость индекса цветопередачи, рассчитанного методами CRI и CQS, от цветовой температуры. Таблица 2.

Комбинации СД	Тцв, К											
	2700		3500		4000		5000		5700		6500	
	CRI	CQS	CRI	CQS	CRI	CQS	CRI	CQS	CRI	CQS	CRI	CQS
2,6, 4, 3	92	90	90	89	86	83	81	79	78	76	75	73
8, 10, 11, 13	82	81	86	79	86	78	89	80	81	77	82	79
16, 17, 19,17	82	81	86	80	87	79	89	79	81	78	82	79

1 СД - на основе 2, 6, 4, 3 кристаллов (значения  $\lambda_{\max}$  и  $\Delta\lambda_{0,5}$  - 471 нм и 20 нм, 525 нм и 35 нм, 600 нм и 115 нм, 625 нм и 16 нм соответственно).

2 СД - на основе 8, 10, 11, 13 кристаллов (значения  $\lambda_{\max}$  и  $\Delta\lambda_{0,5}$  - 449 нм и 20 нм, 520 нм и 35 нм, 590 нм и 18 нм, 632 нм и 18 нм соответственно).

3 СД - на основе 16, 17, 19, 17 кристаллов (значения  $\lambda_{\max}$  и  $\Delta\lambda_{0,5}$  - 449 нм и 20 нм, 520 нм и 35 нм, 590 нм и 18 нм, 632 нм и 19 нм соответственно).

Из проведенных расчетов можно сделать вывод о том, что:

1. Наилучшей цветопередачей обладают белые СД на основе 6 кристалла, что связано с высоким значением  $\Delta\lambda_{0,5} = 115$  нм.

2. Менее половины из рассчитанных белых многокристальных СД могут использоваться в освещении внутренних помещений ( $Ra < 70$ ).

Очевидно, что наилучшую цветопередачу имеет белый СД, спектр которого наиболее равномерно заполняет видимый диапазон. То есть на кристаллах с примерно равномерно распределёнными по этому диапазону максимумами излучения и с наиболее широкими спектрами.

### 3.1. Влияние способа аппроксимации спектра цветных СД

Для того чтобы оптимизировать и сделать универсальным процесс расчётов, уменьшить затрачиваемое время и максимально упростить процесс, в среде MATLAB была написана программа, позволяющая быстро и удобно производить необходимые вычисления и получать результаты в наглядной форме.

На рис. 26 приведены результаты расчёта цветопередачи для белого СД №1. На графике изображены спектры белых многокристалльных СД, полученных на основе цветных кристаллов, спектры которых аппроксимированы по рекомендации МКО и по нормальному распределению

R1-R8 – частные индексы цветопередачи;

R9-R14 – специальные индексы цветопередачи;

DE1-DE15 – частные индексы, рассчитанные методом CQS;

Ra – общий индекс цветопередачи по методу МКО;

Qa - индекс шкалы цветности по методу CQS;

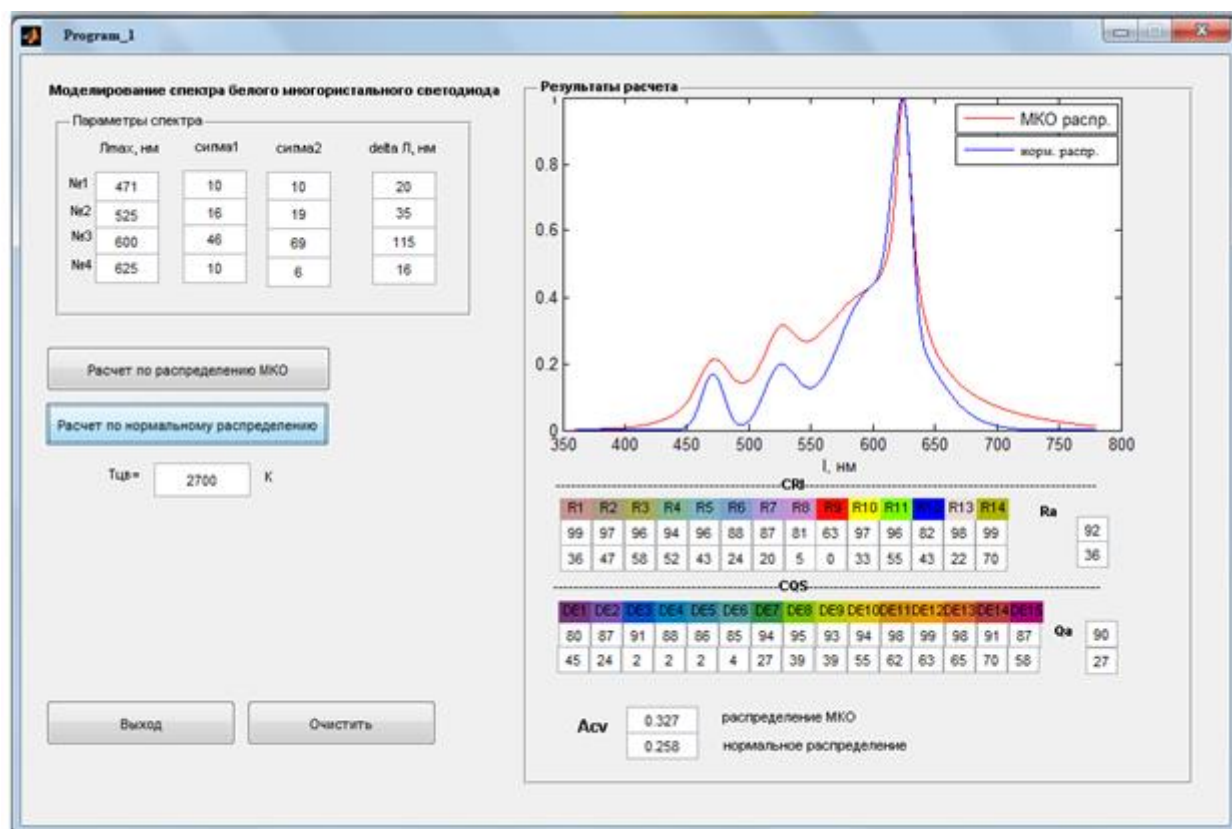


Рис. 26. Вид окна программы.

Программа позволяет:

- определить такие значения параметров спектров цветных СД, при которых белый СД будет иметь наилучшую цветопередачу;
- рассчитывать цветовые характеристики белого ИС, а так же производить оценку цветопередачи по методу CRI (рассчитываются частные, специальные и общий индексы цветопередачи) и по методу CQS;
- моделировать спектры цветных СД, используя аппроксимацию по рекомендации МКО (исходные данные -  $\lambda_d$ ,  $\Delta\lambda_{0.5}$ ) или аппроксимацию нормальным распределением (исходные данные -  $\lambda_d$ ,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ );
- рассчитать коэффициент циркадной эффективности.

Все рассчитанные спектры цветных кристаллов проводились с шагом 1 нм. Результаты вычислений приведены в таблице 3.

Изменение Ra в зависимости от способа аппроксимации Таблица 3.  
спектра цветных кристаллов.

№ СД		Тцв, К											
		2700		3500		4000		5000		5700		6500	
		CRI	CQS	CRI	CQS	CRI	CQS	CRI	CQS	CRI	CQS	CRI	CQS
1	МКО распр.	92	90	90	89	86	83	81	79	78	76	75	73
	Норм. распр.	36	27	34	11	26	22	22	33	16	29	19	32
2	МКО распр.	82	81	86	79	86	78	89	80	81	77	82	79
	Норм. распр.	80	80	81	79	79	78	76	79	63	73	62	74
3	МКО распр.	82	81	86	80	87	79	89	79	81	78	82	79
	Норм. распр.	79	79	79	79	77	78	80	79	60	73	59	74



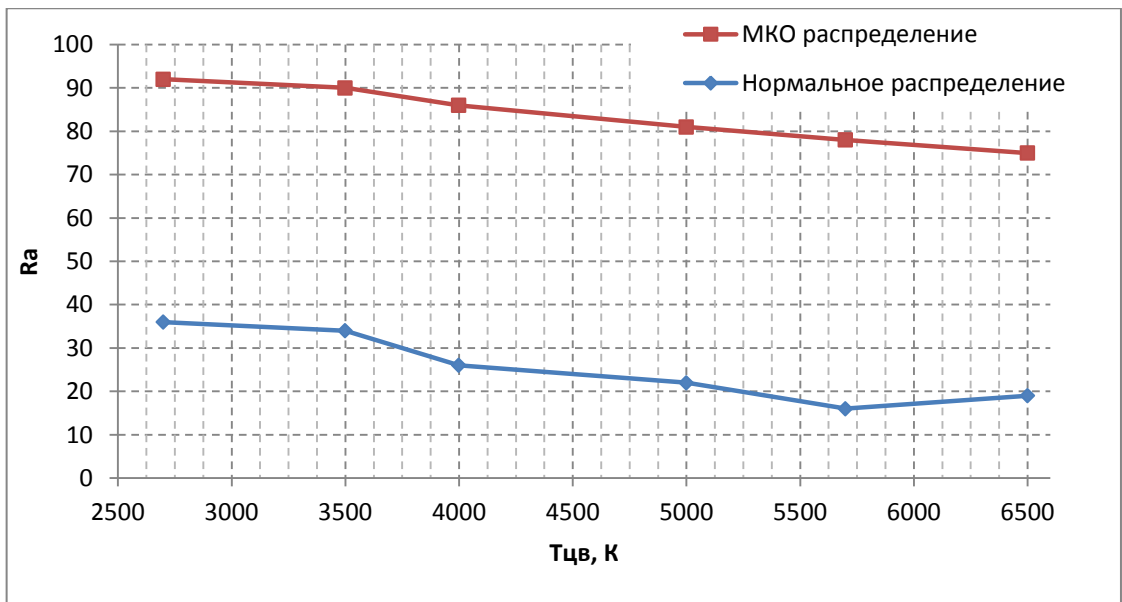


Рис. 27. Зависимость Ra от способа аппроксимации цветных кристаллов и Tcv для СД №1.

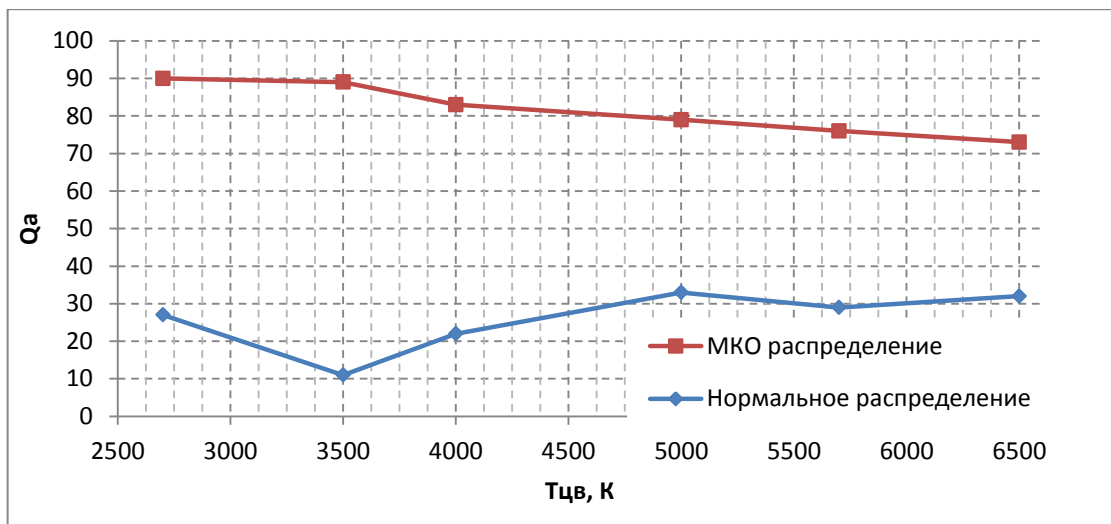


Рис. 28. Зависимость Qa от способа аппроксимации цветных кристаллов и Tcv для СД №1.

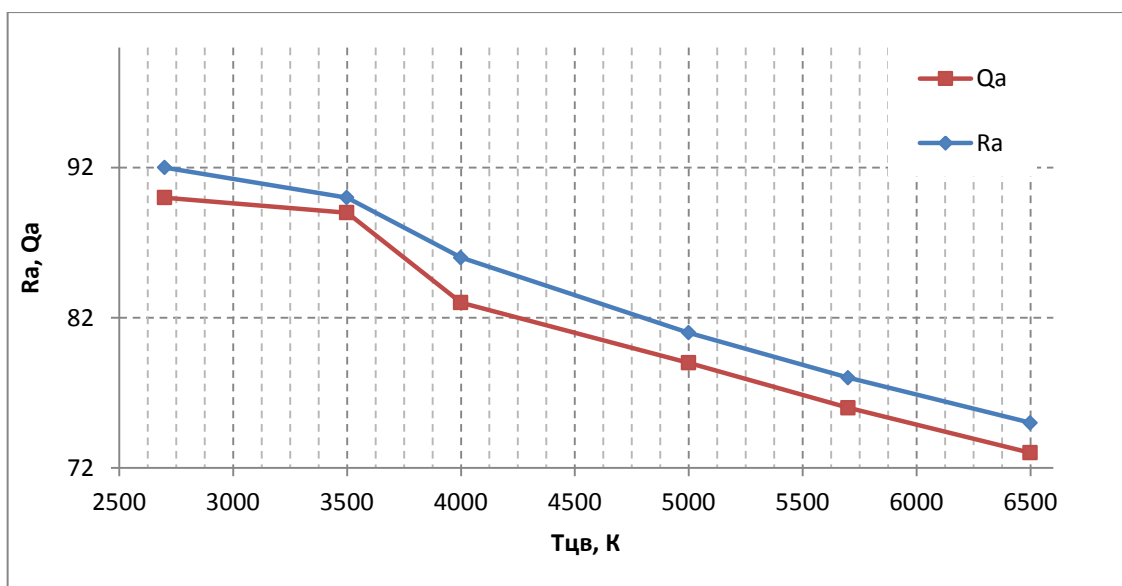


Рис. 29. Зависимость Ra, Qa от Tcv (аппроксимация по рекомендации MKO) для СД №1.

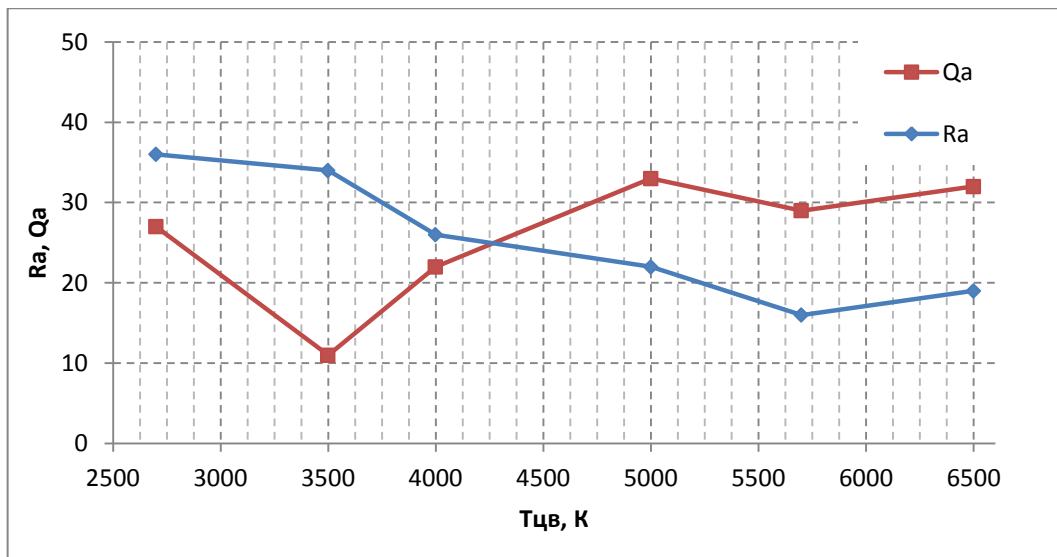


Рис. 30. Зависимость Ra, Qa от Tcv (аппроксимация по нормальному распределению) для СД №1.

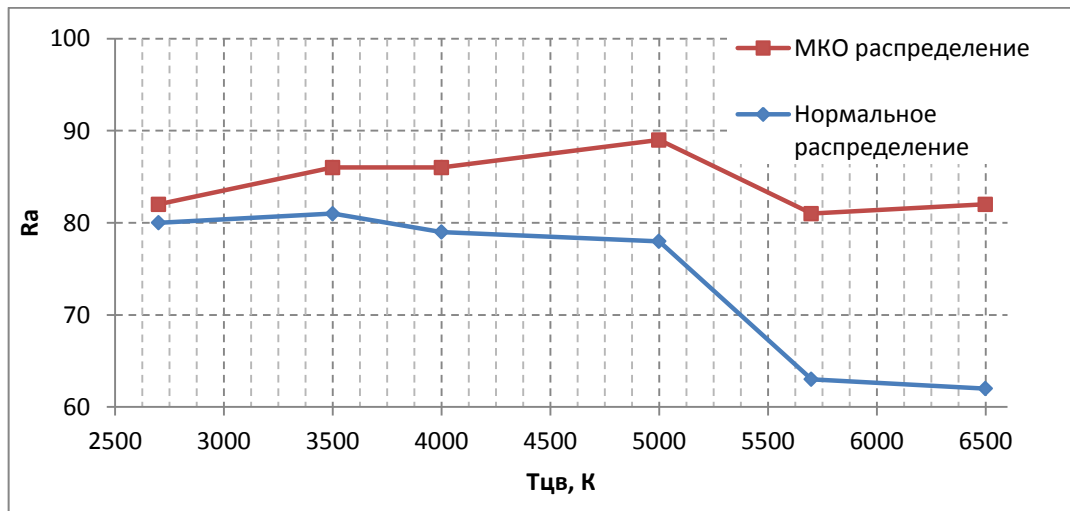


Рис. 31. Зависимость Ra от способа аппроксимации цветных кристаллов и Tcv для СД №2.

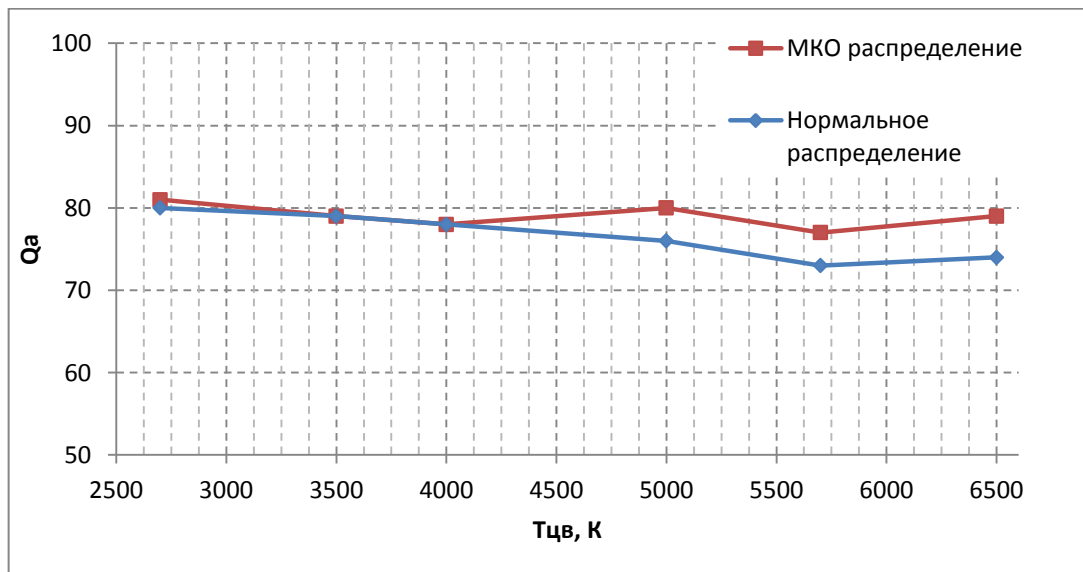


Рис. 32. Зависимость Qa от способа аппроксимации цветных кристаллов и Tcv для СД №2.

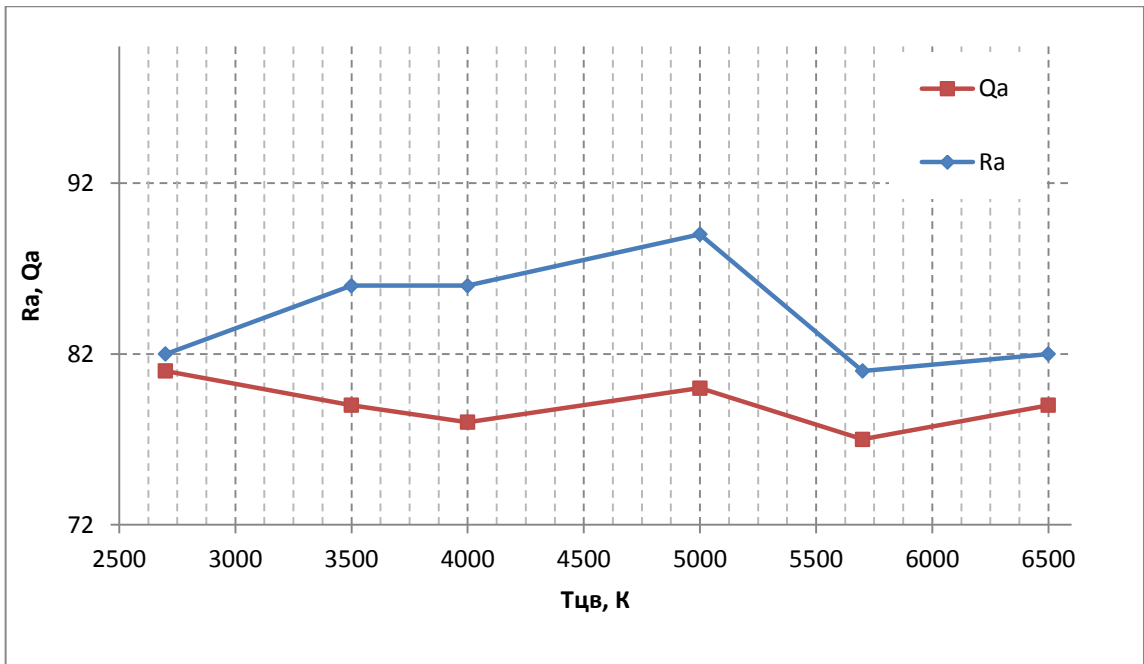


Рис. 33. Зависимость Ra, Qa от Tcv (аппроксимация по рекомендации МКО) для СД №2.

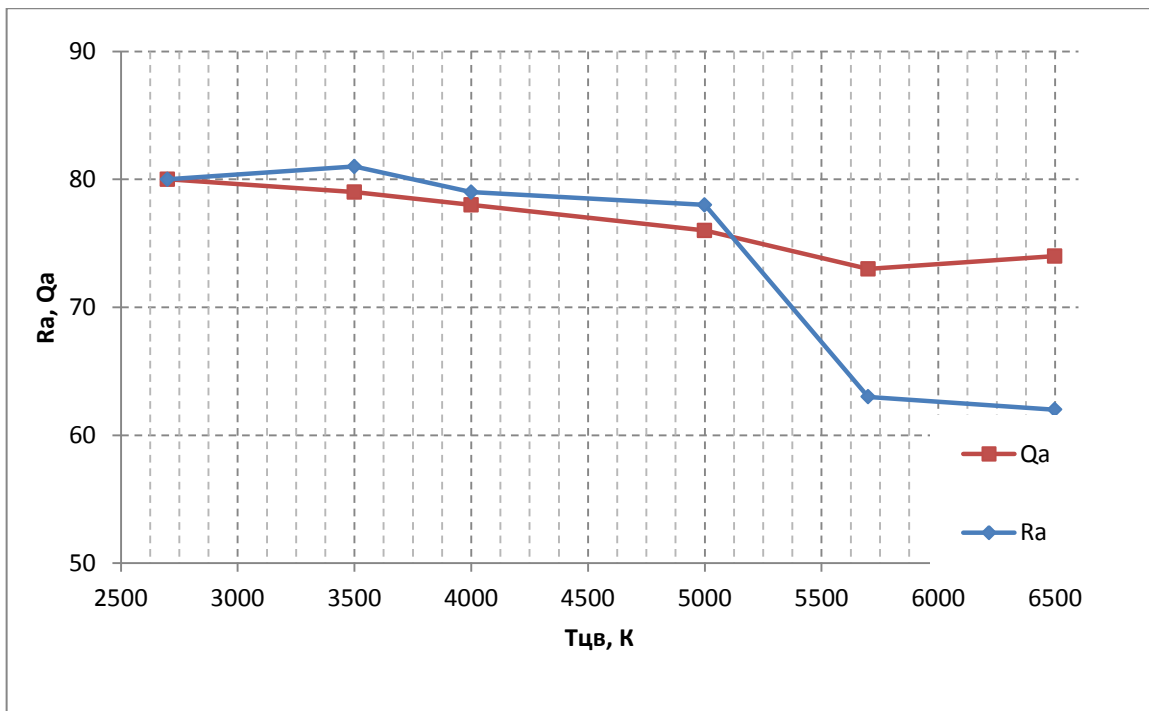


Рис. 34. Зависимость Ra, Qa от Tcv (аппроксимация по нормальному распределению) для СД №2.

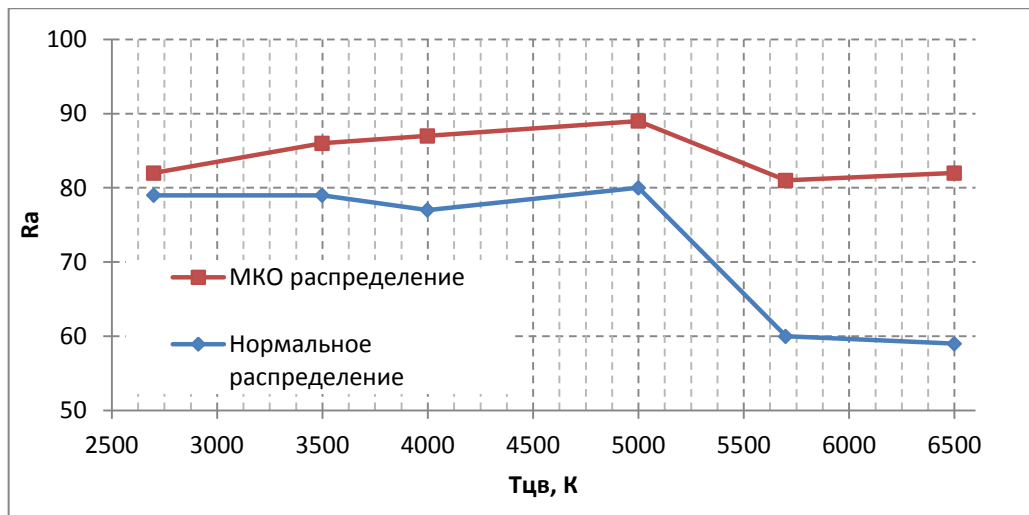


Рис. 35. Зависимость Ra от способа аппроксимации цветных кристаллов и Tcv для СД №3.

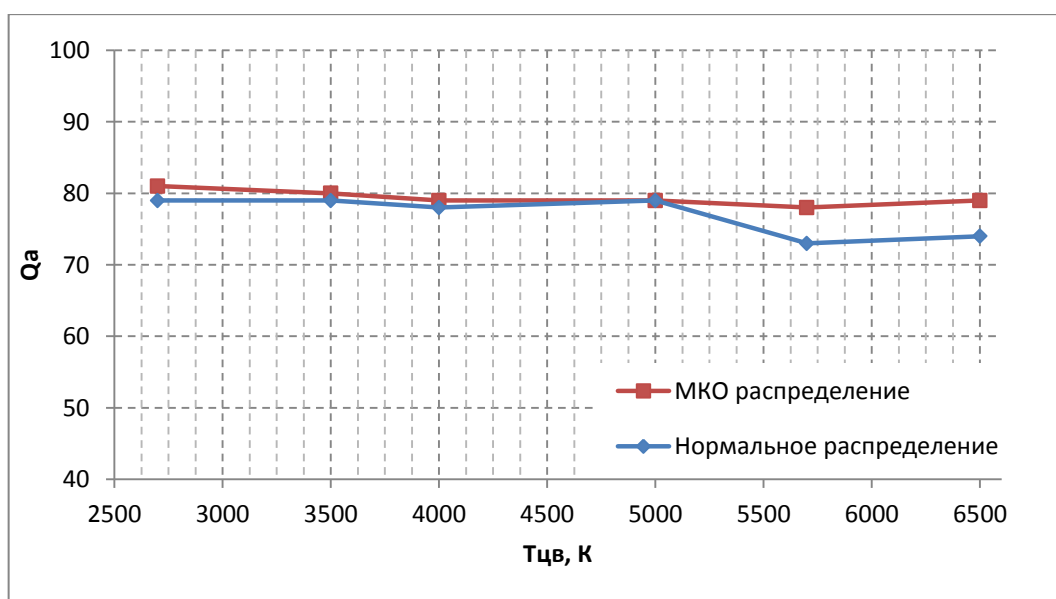


Рис. 36. Зависимость Qa от способа аппроксимации цветных кристаллов и Tcv для СД №3.

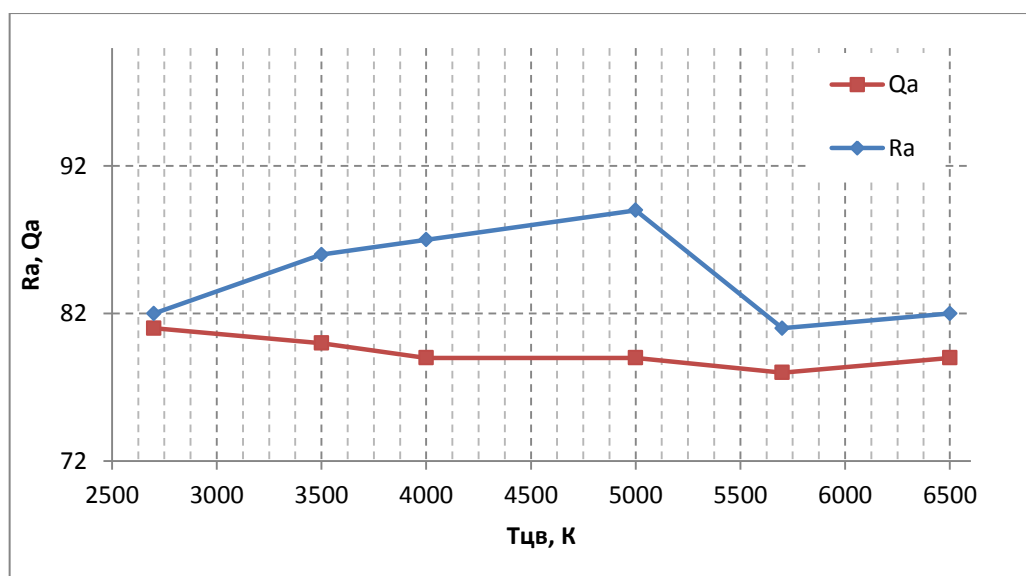


Рис. 37. Зависимость Ra, Qa от Tcv (аппроксимация по рекомендации MKO) для СД №3.

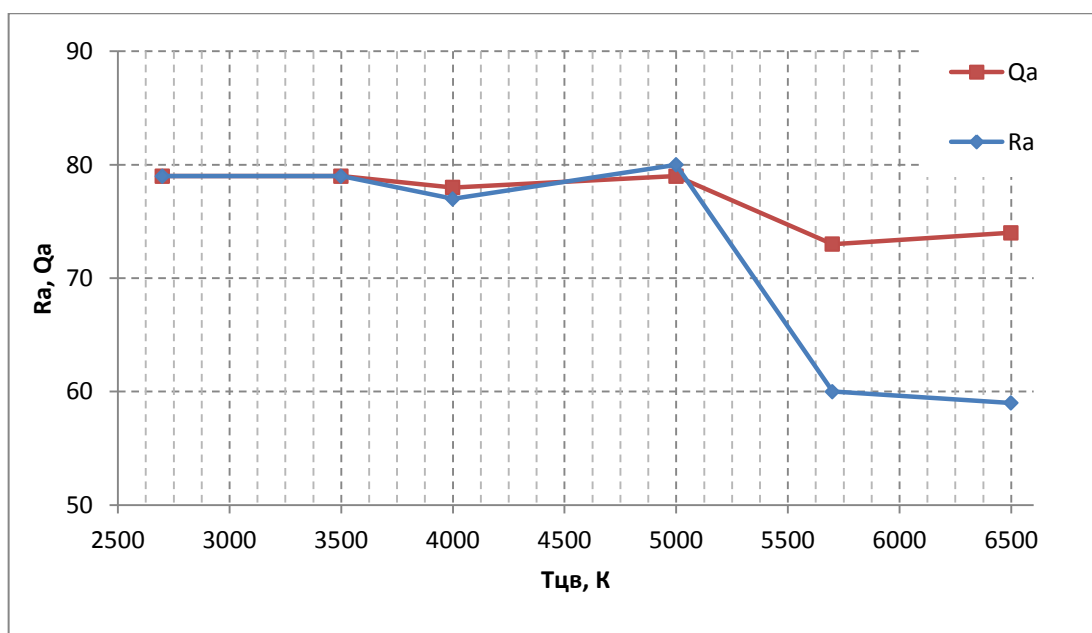


Рис. 38. Зависимость Ra, Qa от Tcv (аппроксимация по нормальному распределению) для СД №3.

Из представленных результатов можно сделать вывод о том, что:

1. Значения для СД №1 рассчитанные по методу CRI и по методу шкалы цветности при аппроксимации по рекомендации МКО практически не отличаются (не более, чем на 3 единицы), это объясняется тем, что все частные и специальные индексы цветопередачи имеют примерно равные значения, то есть резкое ухудшение цветопередачи для каких-либо образцов отсутствует. Например, на рис. 26 приведён спектр белого СД №1 с  $T_{cv}=2700$  К. Частные индексы цветопередачи имеют значения не ниже 81, специальные – не ниже 63 (насыщенный красный). Наименьшее значение частного индекса  $Q_i = 80$  наблюдается у образца фиолетового цвета (1 образец).

При этом значения Ra и Qa, рассчитанные по аппроксимации, рекомендованной МКО, и значениями Ra и Qa, рассчитанные по нормальному распределению отличаются в среднем на 52 пункта, что приводит к тому, что данный СД можно использовать только в местах где отсутствуют требования по качеству цветопередачи. Это связано с тем, что у цветного кристалла 6 (Amber) левая половина спектра значительно уже правой, что приводит провалу в зелено-желтой области.

2. Значения для СД №2, СД №3 рассчитанные по методу CRI и по методу шкалы цветности при аппроксимации по рекомендации МКО отличаются не более чем на 10 пунктов. Это связано с тем, что в их составе находятся цветные кристаллы с  $\Delta\lambda_{0,5} \leq 35$  нм, в отличие от СД №1, в составе которого находится кристалл №6 с  $\Delta\lambda_{0,5}=115$  нм. При этом значения рассчитанные по методу шкалы цветности ниже, чем значения рассчитанные по методу CRI.

Также можно наблюдать довольно близкие значения Ra и Qa, полученные в результате расчета по аппроксимации, рекомендованной МКО и нормальному распределению в диапазоне  $T_{цв}=2700-5000$  К. Это связано с тем, что для трех кристаллов из четырех, значения  $\sigma_1 + \sigma_2 = \Delta\lambda_{0,5}$  почти совпадали, что не приводило к сильному изменению спектра белого СД.

3. Значения Qa, в отличие от значений Ra, имеют более линейную зависимость от  $T_{цв}$ , что связано с особенностями спектра источника, а также методики расчета. Поэтому использование метода шкалы цветности является более целесообразным.

В таблице 4 представлены значения коэффициента  $a_{cv}$  в зависимости от метода аппроксимации спектра цветных кристаллов и цветовой температуры.

Значения  $a_{cv}$ , в зависимости от метода аппроксимации спектра цветных кристаллов. Таблица 4.

№ СД		Т <sub>цв</sub> , К					
		2700	3500	4000	5000	5700	6500
1	МКО распр.	0,367	0,529	0,618	0,76	0,856	0,934
	Норм. распр.	0,335	0,496	0,587	0,734	0,834	0,917
2	МКО распр.	0,369	0,526	0,617	0,76	0,856	0,934
	Норм. распр.	0,334	0,491	0,583	0,731	0,83	0,912
3	МКО распр.	0,327	0,483	0,573	0,716	0,8	0,885
	Норм. распр.	0,258	0,462	0,575	0,761	0,867	0,969

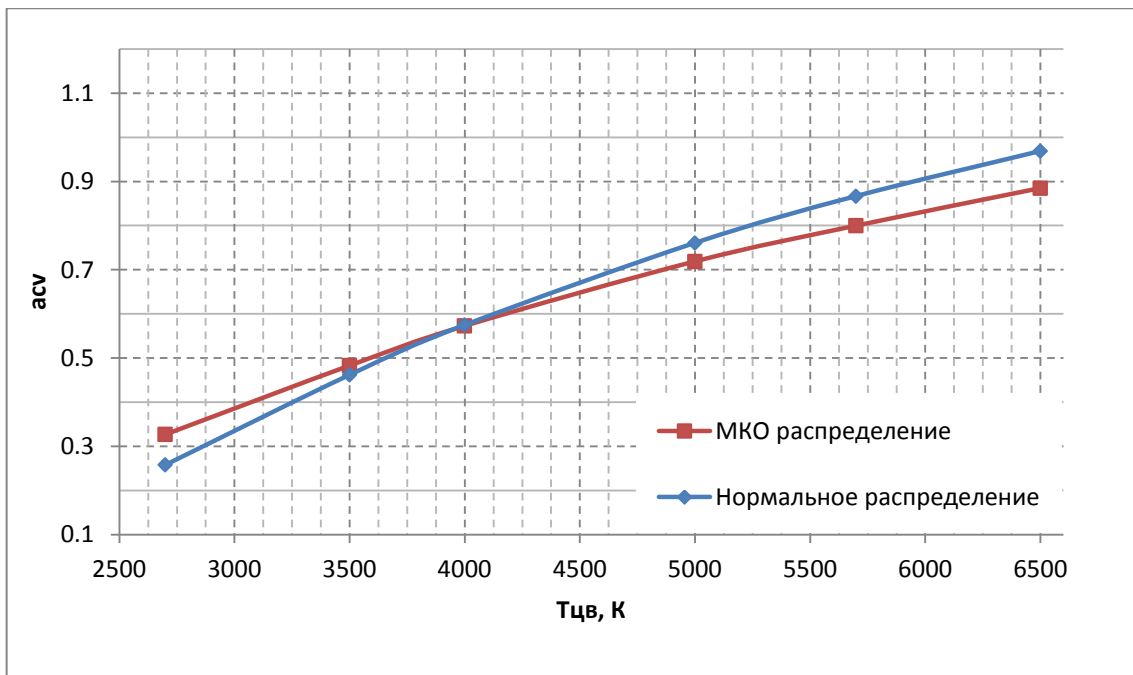


Рис. 39. Зависимость значений  $a_{cv}$  от метода аппроксимации цветных кристаллов для СД №1.

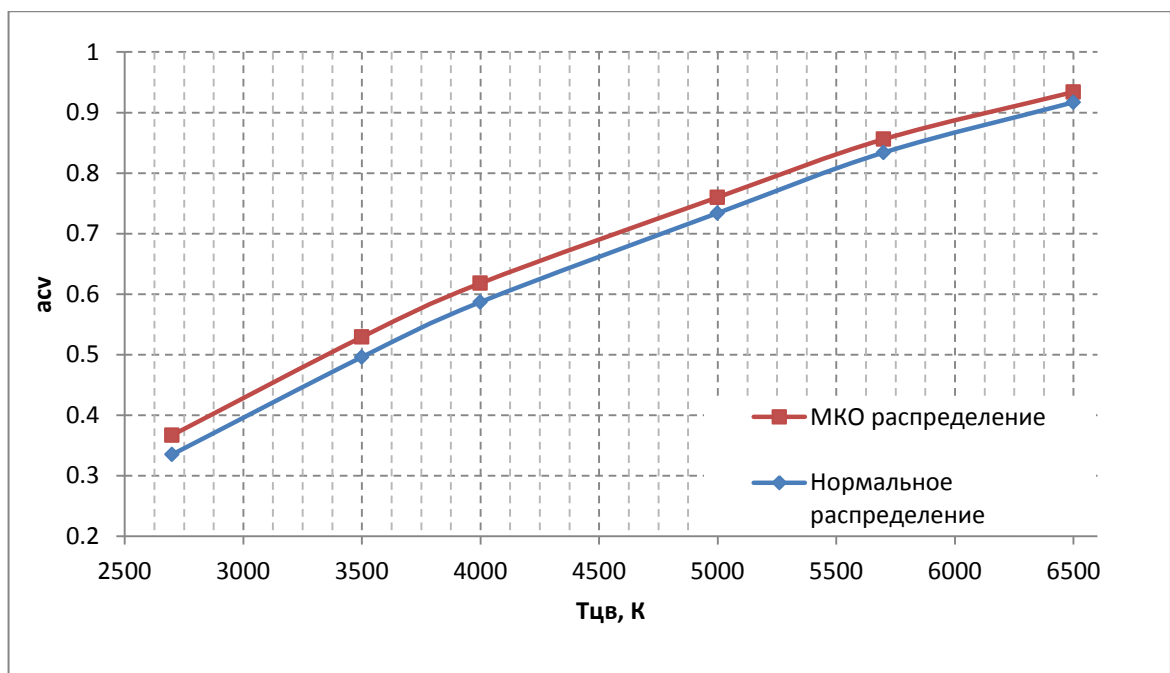


Рис. 40. Зависимость значений  $a_{cv}$  от метода аппроксимации цветных кристаллов для СД №2.

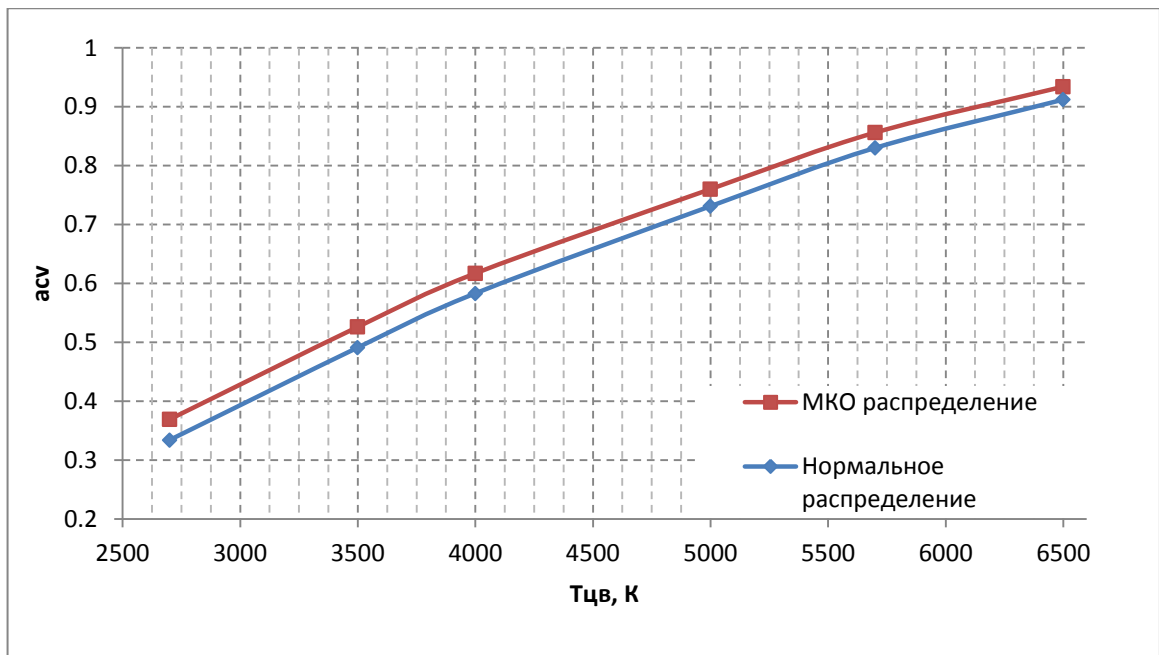


Рис. 41. Зависимость значений  $a_{cv}$  от метода аппроксимации цветных кристаллов для СД №3.

Из представленных графиков видно, что:

1. Влияние метода аппроксимации на коэффициент  $a_{cv}$  незначительно.
2. С ростом  $T_{cv}$  значения коэффициента  $a_{cv}$  также увеличиваются, что связано с увеличением доли синего излучения в спектре белых СД.

### 3.2. Влияние тока через СД на его характеристики

Пропорция излучений цветных СД для получения белого многокристального СД заданной цветности обеспечивается тем, что через каждый из кристаллов пропускается ток своей величины. Если же по каким-то причинам, величина тока через какой-либо из кристаллов изменится, цветность белого СД изменится. Исследуем, насколько сильно влияет изменение тока на цветность белого СД.



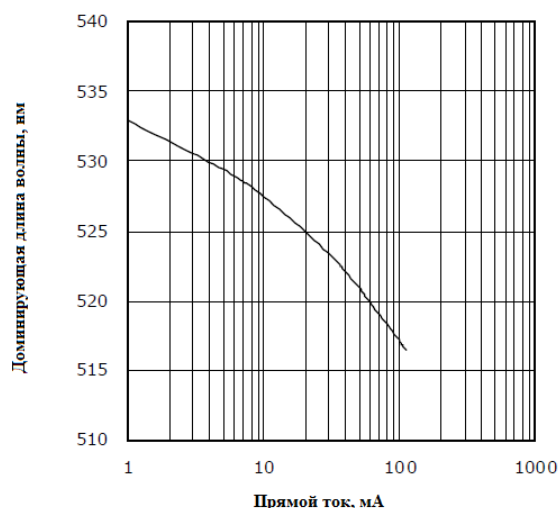


Рис. 42. Зависимость доминирующей длины волны зеленого светодиода компании Nichia от тока ( $T_c=25^\circ\text{C}$ , рабочий ток 20 мА).

На рис. 42 представлена зависимость доминирующей длины волны от тока, проходящего через кристалл. У каждого из представленных в работе цветных светодиодов существует подобная кривая.

Для определения зависимостей характеристик белого СД от тока воспользуемся программой Program\_2, интерфейс которой представлен на рис. 43.

В связи с тем, что большинство фирм-производителей не указывают величины  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  в своих каталогах, в дальнейшем будем использовать для моделирования спектров цветных кристаллов метод, рекомендованный МКО.

Программа позволяет:

- рассчитывать цветовые характеристики белого ИС, а так же производить оценку цветопередачи по методу CRI (рассчитываются частные, специальные и общий индексы цветопередачи) и по методу CQS при разных значениях тока и разных значениях  $T_{цв}$ ;
- рассчитать коэффициент циркадной эффективности при разных значениях тока;
- рассчитать световую эффективность белого СД при различных значениях  $T_{цв}$ .

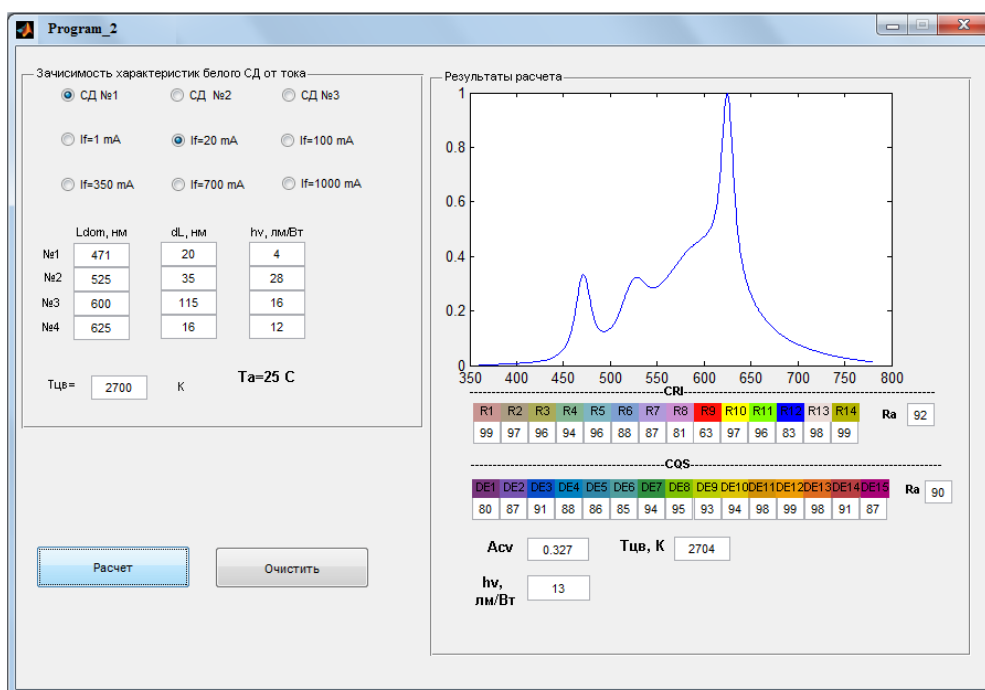


Рис. 43. Вид окна программы.

В таблице 5 представлены значения Ra и Qa в зависимости от тока, проходящего через кристаллы.

Зависимость значений Ra и Qa от тока. Таблица 5.

№ СД		Тцв, К											
		2700		3500		4000		5000		5700		6500	
		Ток, мА	CRI	CQS	CRI	CQS	CRI	CQS	CRI	CQS	CRI	CQS	CRI
1	1 мА	89	84	83	82	79	80	73	77	79	78	75	75
	20 мА	92	90	89	86	86	83	81	79	78	76	75	73
	100 мА	89	83	81	78	75	76	61	68	61	68	59	64
2	1 мА	83	81	86	79	87	78	88	80	82	77	83	78
	700 мА	82	81	86	79	87	78	89	80	81	77	82	79
	1000 мА	72	76	80	79	79	80	81	82	65	79	68	80
3	1 мА	80	80	83	80	84	79	85	80	76	77	86	79
	350 мА	82	81	86	80	87	79	89	80	81	78	81	79
	1000 мА	73	77	80	79	80	80	81	82	64	78	68	80

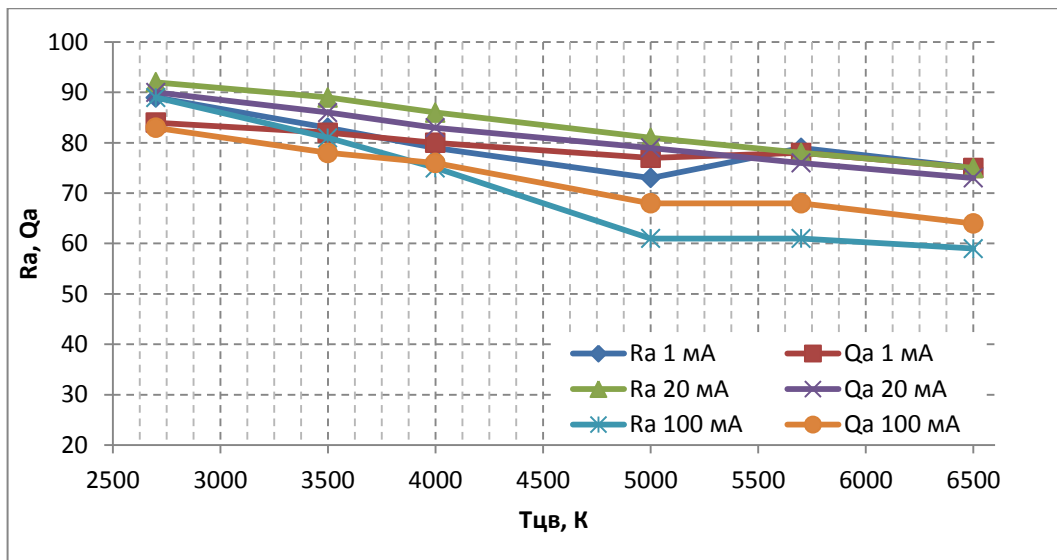


Рис. 44. Зависимость Ra и Qa от тока, протекающего через белый СД №1.

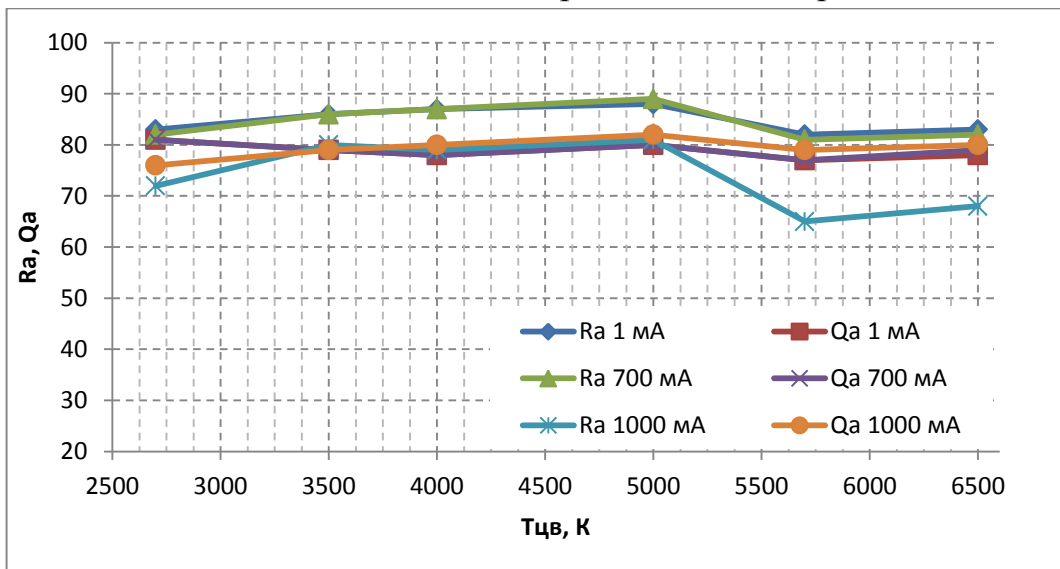


Рис. 45. Зависимость Ra и Qa от тока, протекающего через белый СД №2.

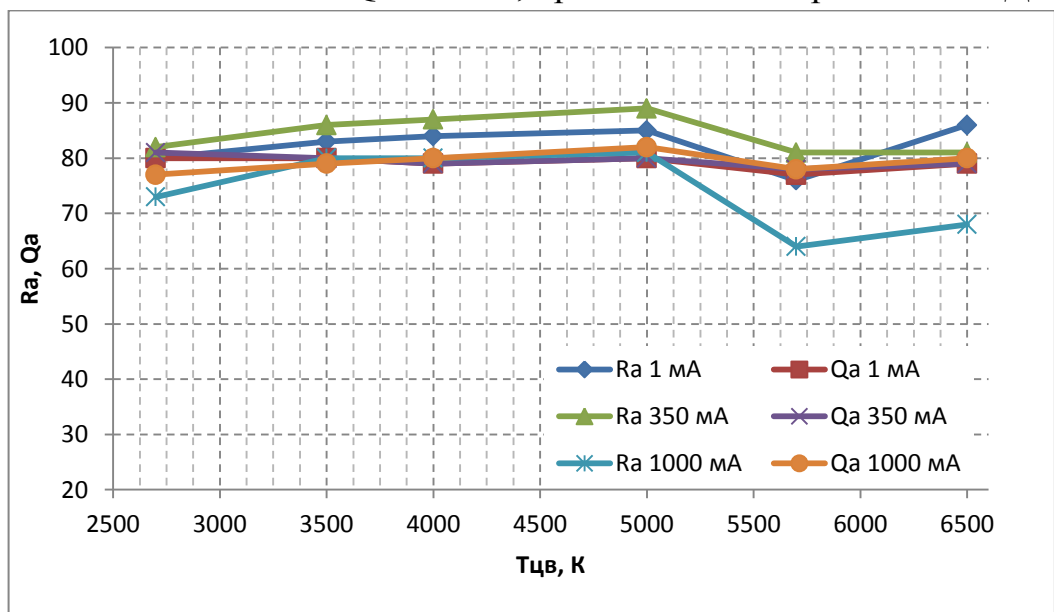


Рис. 46. Зависимость Ra и Qa от тока, протекающего через белый СД №3.

Из представленных графиков видно, что:

1. Наилучшие значения индексов цветопередачи показали белые СД при номинальном токе и рассчитанные по методу МКО.

2. Наихудшие значения индексов цветопередачи показали белые СД при максимальном токе и рассчитанные по методу МКО (значения  $R_a$  опускаются ниже 70 пунктов для СД №2 и СД №3 при  $T_{цв} > 5500$  К, для СД №1 при  $T_{цв} > 4250$  К).

3. Для всех белых СД наблюдается следующая закономерность: значения  $R_a$  и  $Q_a$  максимальны при номинальном токе и минимальны при максимально допустимом токе.

В таблице 6 представлена зависимость  $T_{цв}$  от тока, проходящего через СД.

Зависимость  $T_{цв}$  от тока. Таблица 6.

Т <sub>цв</sub> , К/If, мА		№ СД		
		1	2	3
2700	1 мА	2753	2597	2540
	20/700/350 мА	2704	2705	2705
	100/1000/1000 мА	2740	2774	2707
3500	1 мА	3520	3376	3274
	20/700/350 мА	3498	3498	3499
	100/1000/1000 мА	3565	3494	3519
4000	1 мА	3988	3863	3744
	20/700/350 мА	3998	3998	3999
	100/1000/1000 мА	4111	3943	3960
5000	1 мА	4850	4765	4633
	20/700/350 мА	4995	4997	4997
	100/1000/1000 мА	5277	4992	4995
5700	1 мА	5409	5441	5315
	20/700/350 мА	5696	5696	5696
	100/1000/1000 мА	6145	5540	5610
6500	1 мА	6053	6126	6428
	20/700/350 мА	6497	6498	6498
	100/1000/1000 мА	7225	6420	6428

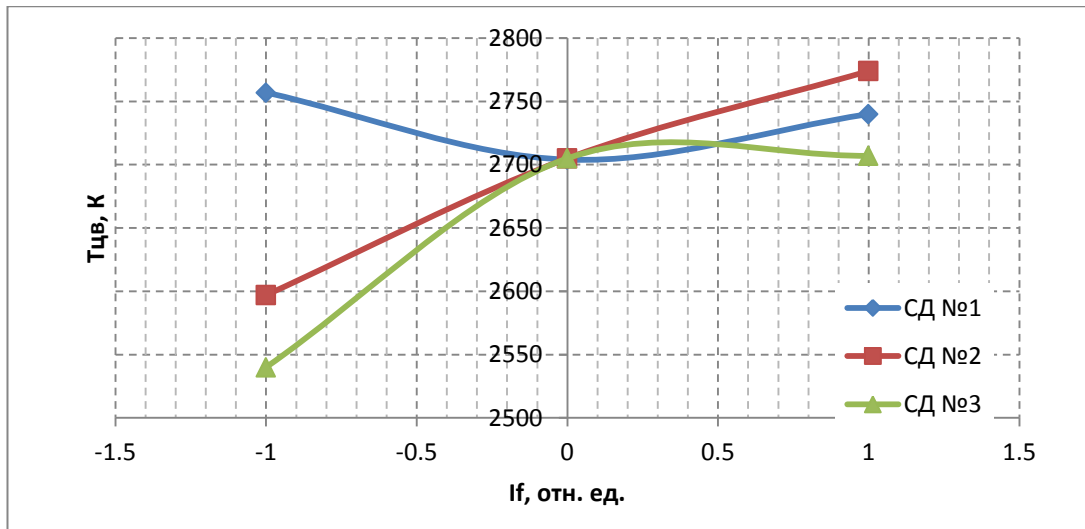


Рис. 47. Зависимость  $T_{cv}$  от тока для СД№1, СД№2, СД№3 при  $T_{cv} = 2700$  К

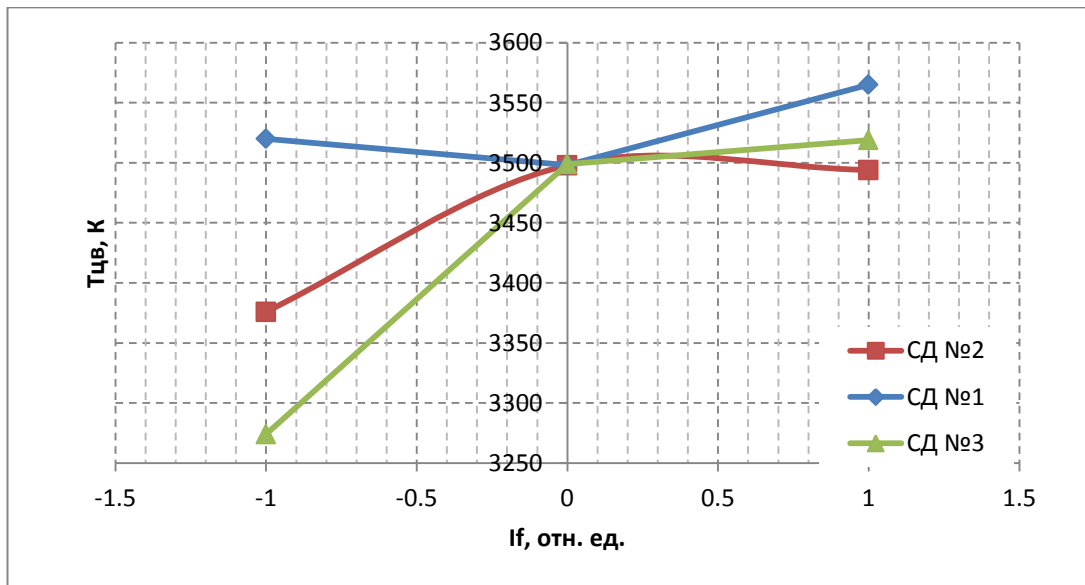


Рис. 48. Зависимость  $T_{cv}$  от тока для СД№1, СД№2, СД№3 при  $T_{cv} = 3500$  К

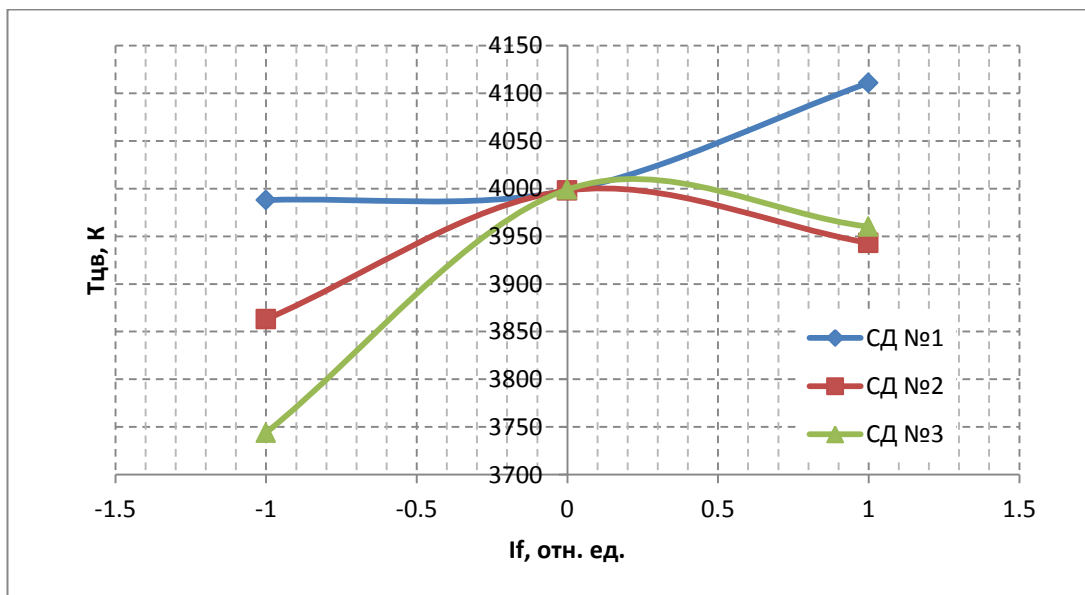


Рис. 49. Зависимость  $T_{cv}$  от тока для СД№1, СД№2, СД№3 при  $T_{cv} = 4000$  К

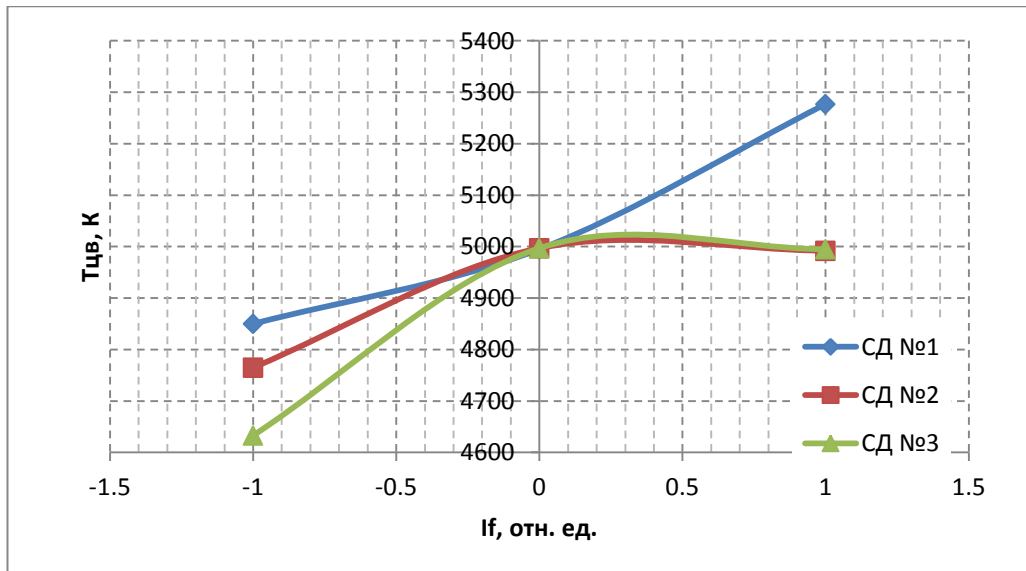


Рис. 50. Зависимость  $T_{cv}$  от тока для СД№1, СД№2, СД№3 при  $T_{cv} = 5000$  К

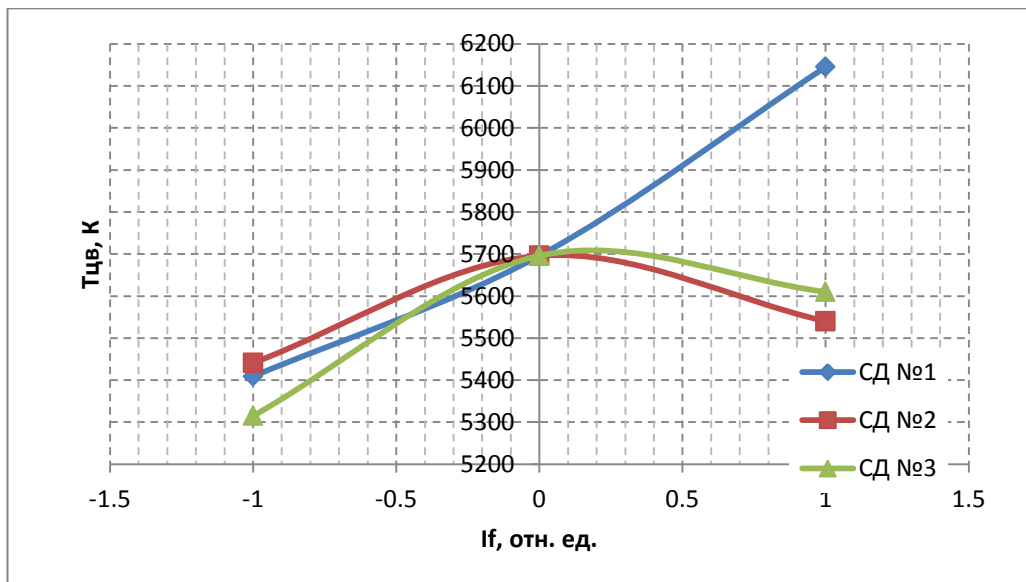


Рис. 51. Зависимость  $T_{cv}$  от тока для СД№1, СД№2, СД№3 при  $T_{cv} = 5700$  К

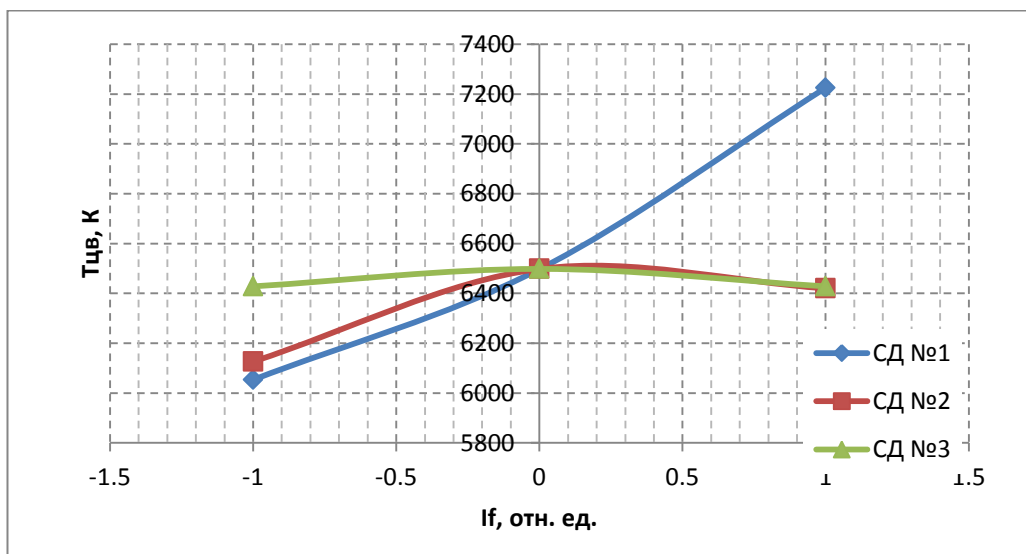


Рис. 52. Зависимость  $T_{cv}$  от тока для СД№1, СД№2, СД№3 при  $T_{cv} = 6500$  К

Из представленных графиков видно, что:

1. С ростом  $T_{цв}$  изменения  $\Delta T_{цв}$  также возрастают. Причем при  $T_{цв} > 5500$  К для всех СД как для предельно максимального, так и предельно минимального значения тока изменения  $\Delta T_{цв}$  становятся недопустимыми (от 70 до 728 К).

Только для СД№1 при  $T_{цв} = 2700$  К изменения тока как большую, так и меньшую сторону не приводят к изменениям  $\Delta T_{цв}$  более чем на 50 К.

2. Для СД№1 при  $T_{цв} > 4000$  К увеличение тока приводит к увеличению  $T_{цв}$ . Для  $T_{цв} < 4000$  К при номинальном токе  $T_{цв}$  показывает минимальный результат.

3. Для СД№2 и СД№3 при номинальном токе значения  $T_{цв}$  максимальны.

В таблице 7 приведены значения коэффициента  $a_{cv}$  от тока, проходящего через СД.

Таблица 7. Зависимость  $a_{cv}$  от тока.

№ СД		$T_{цв}$ , К					
		2700	3500	4000	5000	5700	6500
1	1 мА	0,306	0,443	0,522	0,651	0,725	0,8
	20 мА	0,327	0,483	0,573	0,716	0,8	0,885
	100 мА	0,356	0,532	0,635	0,798	0,887	0,984
2	1 мА	0,338	0,487	0,568	0,701	0,786	0,86
	700 мА	0,367	0,529	0,618	0,76	0,856	0,934
	1000 мА	0,367	0,534	0,628	0,778	0,877	0,961
3	1 мА	0,334	0,479	0,56	0,694	0,787	0,851
	350 мА	0,369	0,526	0,617	0,76	0,856	0,934
	1000 мА	0,368	0,533	0,627	0,779	0,887	0,961

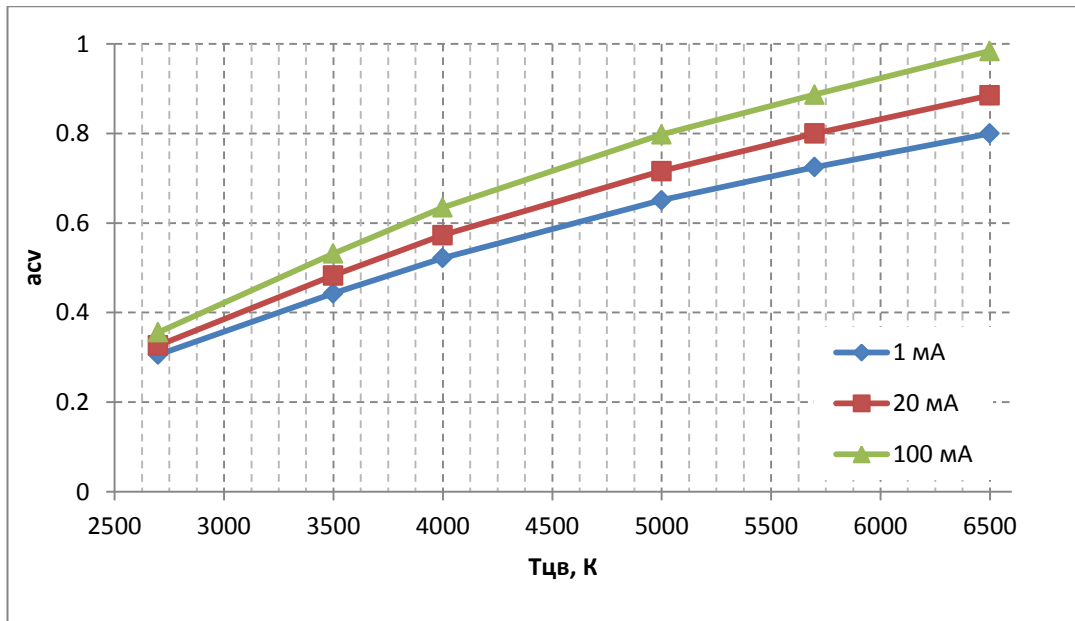


Рис. 53. Зависимость  $a_{cv}$  от тока для СД №1.

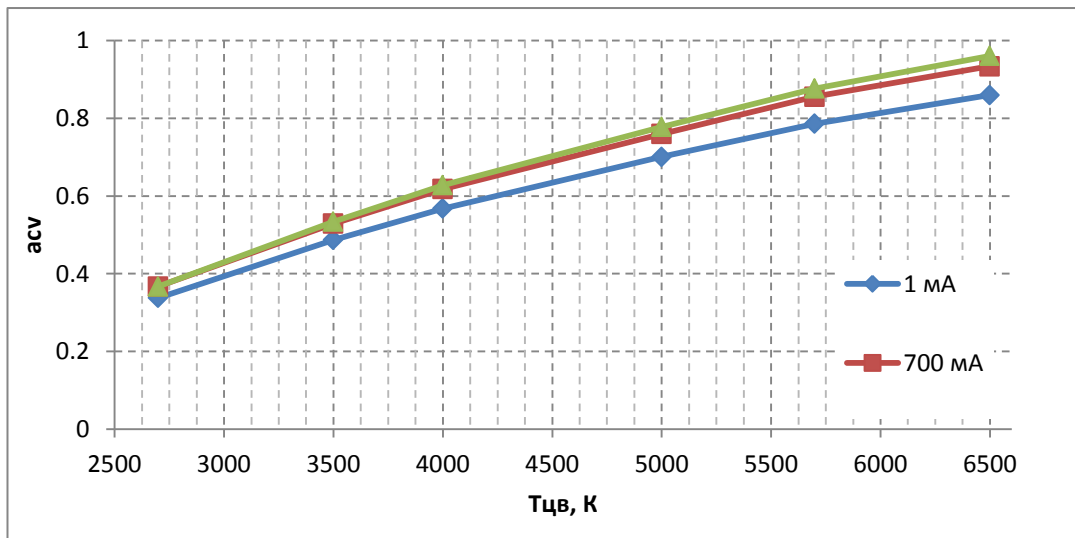


Рис. 54. Зависимость  $a_{cv}$  от тока для СД №2.

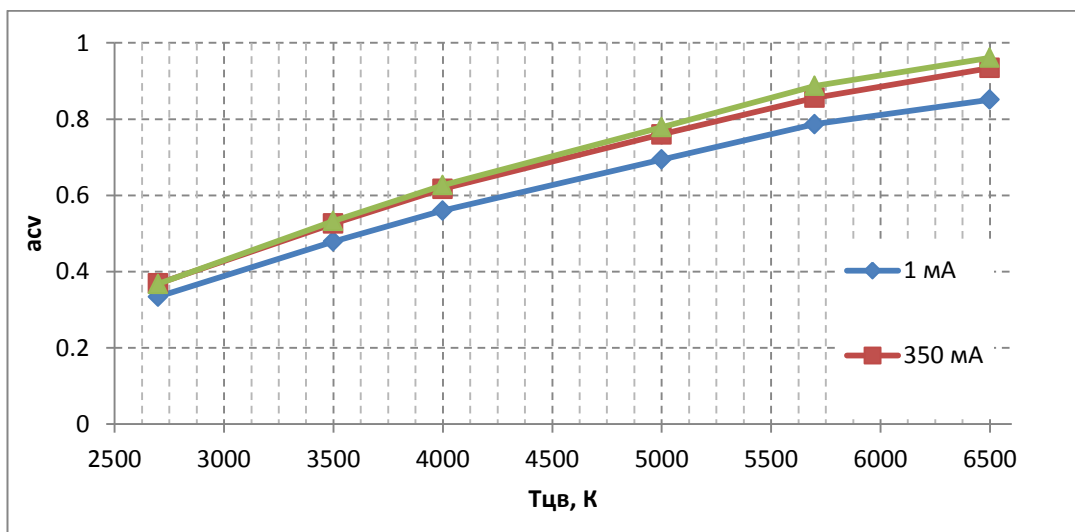


Рис. 55. Зависимость  $a_{cv}$  от тока для СД №3.



Из приведенных данных видно, что с ростом тока увеличиваются значение коэффициента  $a_{cv}$ . При этом изменения значения  $a_{cv}$  от тока составляет не более 10% от значения  $a_{cv}$  при номинальном токе.

### 3.3 Влияние температуры на внешней поверхности СД на его характеристики.

Под влиянием температуры изменяются практически все фундаментальные характеристики светодиодов, указываемые в спецификациях производителем только при комнатных температурах и составляющее основу для указанного проектирования, в то время как устройства на этих светодиодах, как правило работают в широком диапазоне температур. Знание характера изменения характеристик в зависимости от тепловых условий позволит учесть и скорректировать выходные данные указанных осветительных приборов на их основе [37].

На рис. 56 представлена зависимость доминирующей длины волны от температуры на поверхности кристалла СД.

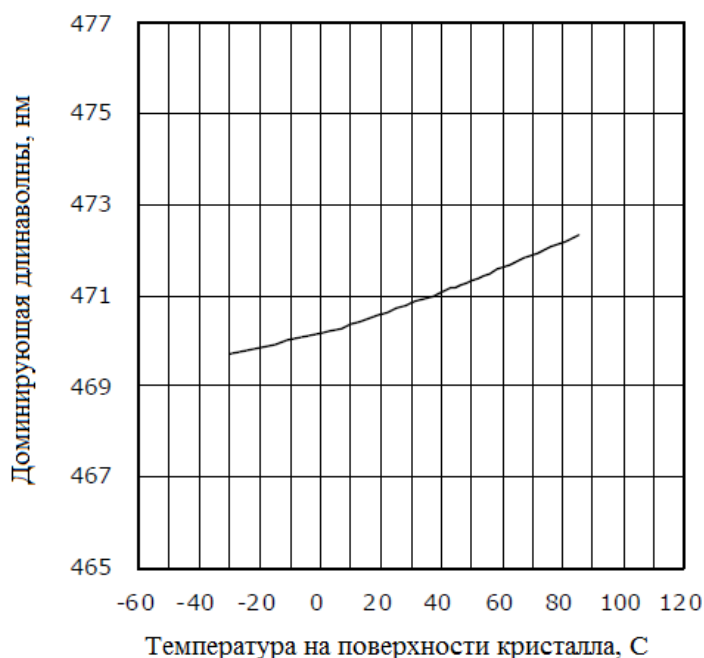


Рис.56. Зависимость доминирующей длины волны от температуры на поверхности кристалла синего светодиода компании Nichia (рабочий ток 20 мА).

Для определения зависимостей характеристик белого СД от температуры на поверхности кристаллов воспользуемся программой Program\_3, интерфейс которой представлен на рис. 57.

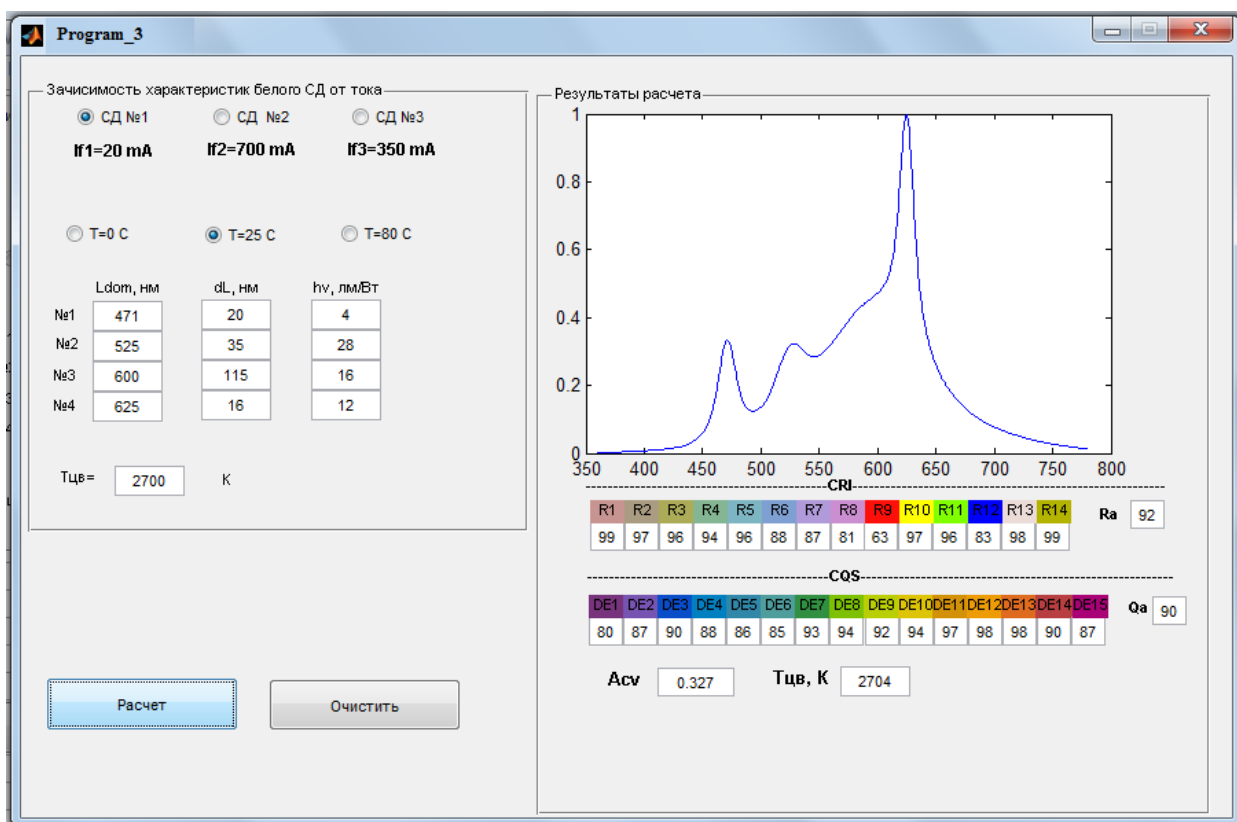


Рис. 57. Вид окна программы.

Программа позволяет:

- рассчитывать цветовые характеристики белого ИС, а так же производить оценку цветопередачи по методу CRI (рассчитываются частные, специальные и общий индексы цветопередачи) и по методу CQS при разных значениях температуры на поверхности кристалла и разных значениях  $T_{цв}$ ;
- рассчитать коэффициент циркадной эффективности при разных значениях температуры на поверхности кристалла и  $T_{цв}$ .

В таблице 8 представлены значения  $R_a$  и  $Q_a$  в зависимости от температуры на поверхности кристаллов, проходящего через СД.

Зависимость значений Ra и Qa от температуры на  
поверхности кристаллов.

Таблица 8.

№ СД		Тцв, К											
		2700		3500		4000		5000		5700		6500	
		CRI	CQS	CRI	CQS	CRI	CQS	CRI	CQS	CRI	CQS	CRI	CQS
1	0°C	92	89	89	85	85	83	77	77	76	75	73	72
	25°C	92	90	89	86	86	83	81	79	78	76	75	73
	80°C	94	91	89	86	85	83	80	79	79	76	75	74
2	0°C	78	78	86	80	86	80	88	82	76	81	77	82
	25°C	82	81	86	79	87	78	89	80	81	77	82	79
	80°C	64	63	64	68	65	70	65	74	56	70	57	71
3	0°C	79	78	85	80	86	81	88	82	74	81	77	82
	25°C	82	81	86	80	87	79	89	80	81	78	81	79
	80°C	64	63	65	69	65	71	66	74	55	70	58	72

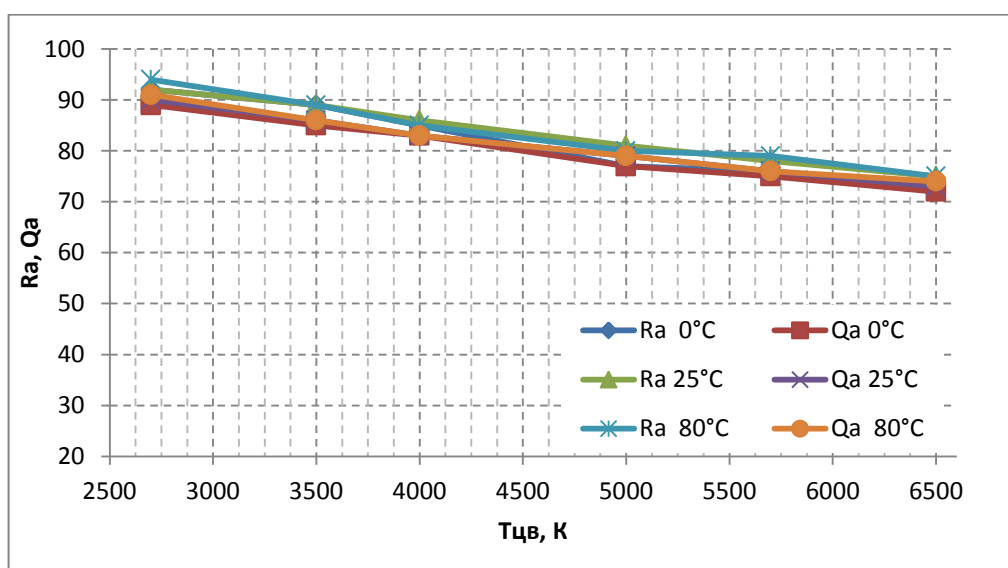


Рис. 58. Зависимость Ra, Qa от температуры на поверхности кристаллов для СД№1.

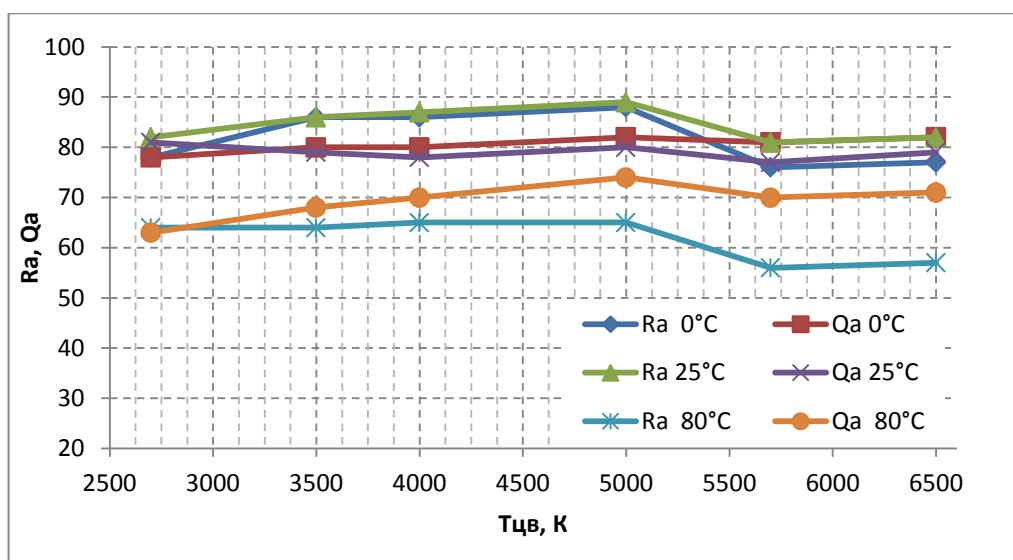


Рис. 59. Зависимость Ra, Qa от температуры на поверхности кристаллов для СД№2.

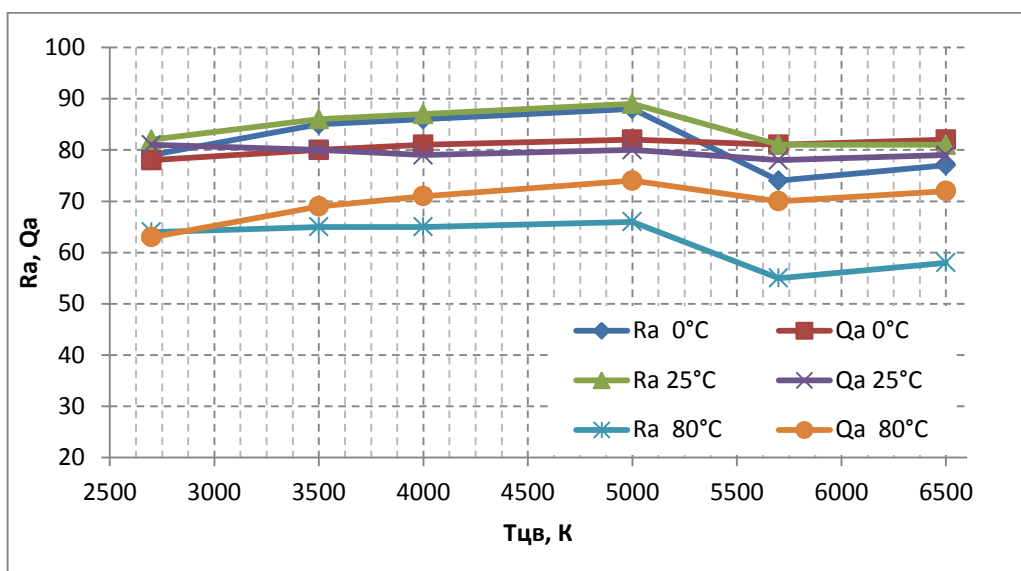


Рис. 60. Зависимость Ra, Qa от температуры на поверхности кристаллов для СД№3.

Из представленных графиков можно увидеть, что:

1. Для СД№1 все значения Ra и Qa не опускаются ниже 70 единиц при изменении температуры на поверхности кристалла от 0 до 80 °С. Это означает что данный белый СД может использоваться в различных климатических зонах и в помещениях с различными температурными режимами. Способ расчета индекса цветопередачи по методу МКО и методу индекса шкалы цветности практически не влияет на результат.

2. Для СД №2 и СД №3 наилучшие значения цветопередачи получены при T<sub>с</sub>=25°С, рассчитанные методом МКО. Наихудший результаты получены при T<sub>с</sub>=80°С, рассчитанные также методом МКО. При этом результаты

полученные при  $T_c=80^\circ\text{C}$ , рассчитанные обоими методами, практически все опустились ниже 70 единиц, и соответственно применяются в целях освещения помещений с высокими требованиями по качеству цветопередачи не могут.

В таблице 9 представлена зависимость  $T_{цв}$  от температуры на поверхности кристаллов.

Зависимость  $T_{цв}$  от температура на поверхности кристаллов. Таблица 9.

$T_{цв}, K/T_c, ^\circ\text{C}$		№ СД		
		1	2	3
2700	$0^\circ\text{C}$	2712	2681	2678
	$25^\circ\text{C}$	2704	2704	2702
	$80^\circ\text{C}$	2704	2418	2424
3500	$0^\circ\text{C}$	3511	3395	3409
	$25^\circ\text{C}$	3498	3498	3499
	$80^\circ\text{C}$	3494	3127	3130
4000	$0^\circ\text{C}$	4014	3833	3844
	$25^\circ\text{C}$	3998	3998	3999
	$80^\circ\text{C}$	3996	3596	3604
5000	$0^\circ\text{C}$	5041	4779	4781
	$25^\circ\text{C}$	4995	4997	4997
	$80^\circ\text{C}$	4961	4527	4537
5700	$0^\circ\text{C}$	5781	5311	5370
	$25^\circ\text{C}$	5696	5696	5696
	$80^\circ\text{C}$	5611	5180	5248
6500	$0^\circ\text{C}$	6622	6056	6062
	$25^\circ\text{C}$	6497	6498	6498
	$80^\circ\text{C}$	6383	5919	5930

Данные в таблице 9 представлены на рис. 61-64.

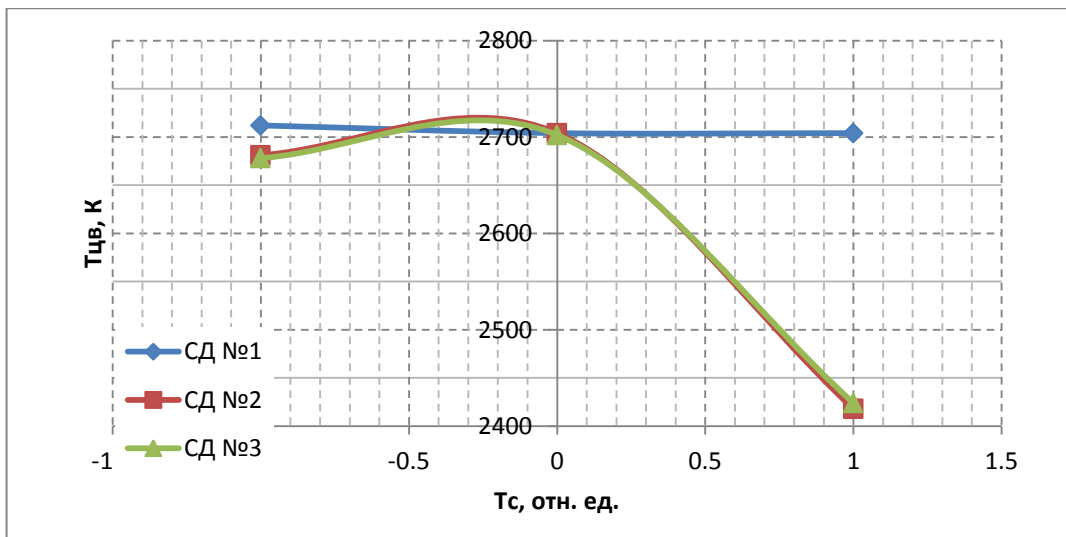


Рис. 61. Зависимость  $T_{cv}$  от температуры на поверхности кристаллов при  $T_{cv}=2700$  К.

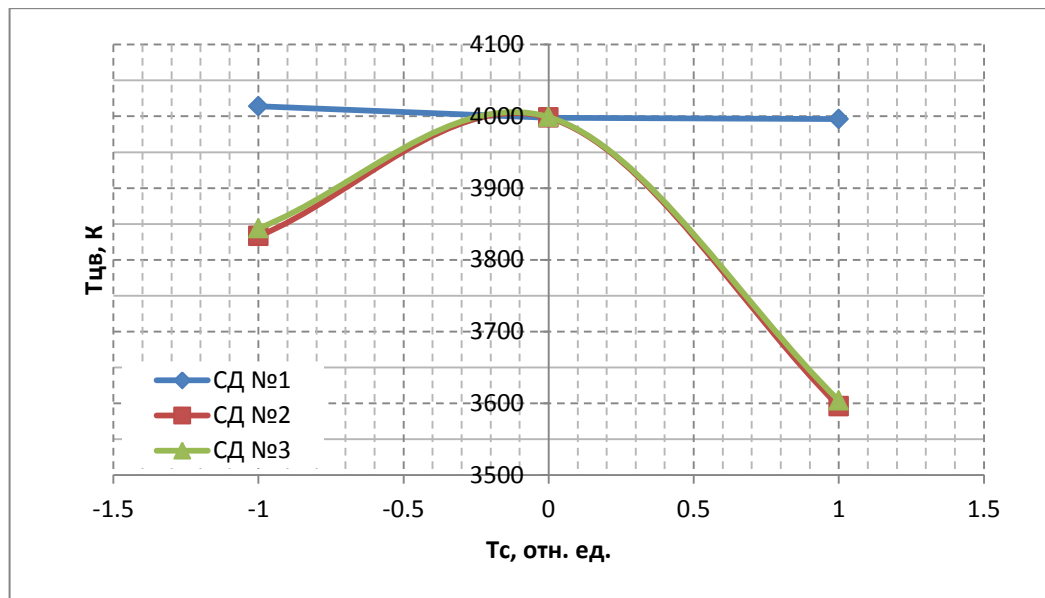


Рис. 62. Зависимость  $T_{cv}$  от температуры на поверхности кристаллов при  $T_{cv}=4000$  К.

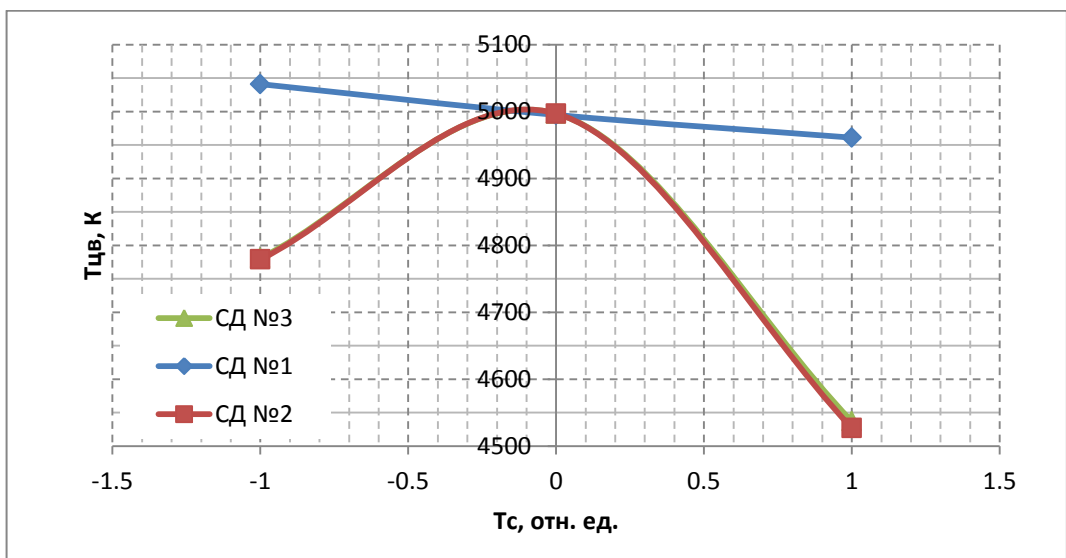


Рис. 63. Зависимость  $T_{cv}$  от температуры на поверхности кристаллов при  $T_{cv}=5000$  К.

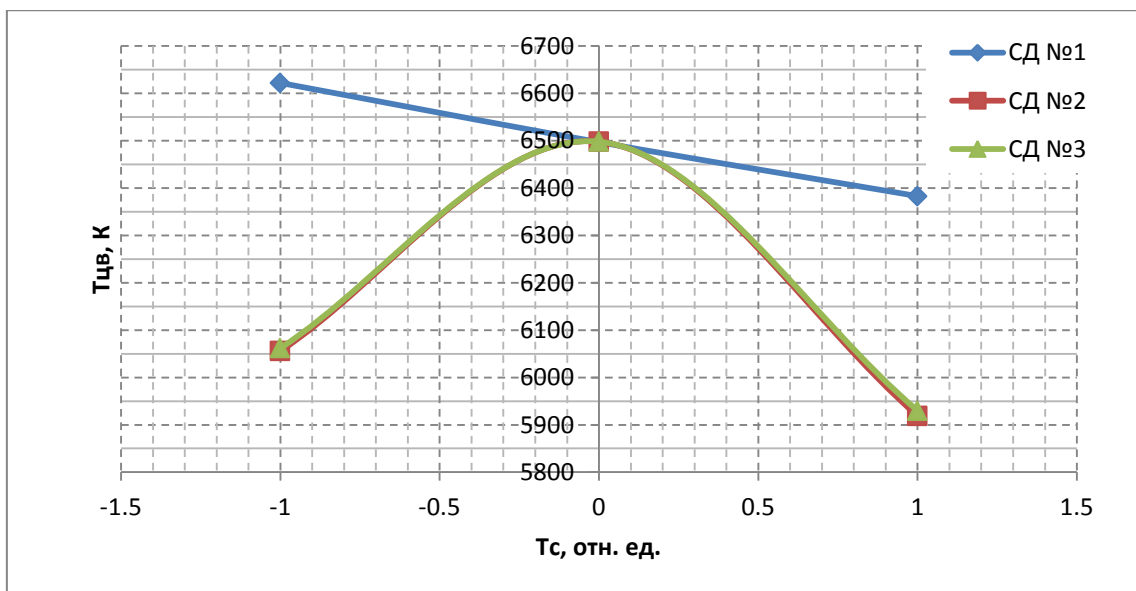


Рис. 64. Зависимость  $T_{cv}$  от температуры на поверхности кристаллов при  $T_{cv}=6500$  К.

Из представленных графиков видно, что:

1. Для СД№1с увеличением температуры на поверхности кристаллов значения  $T_{cv}$  падают. Для  $T_{cv}<5000$ К изменения  $\Delta T_{cv}$  при  $T_c=0-80$  °С составляют допустимые 50 К.

2. Для СД№2 и СД№3 наибольшие значения  $T_{cv}$  наблюдаются при  $T_c=25$ °С. При этом изменения  $\Delta T_{cv}$  при  $T_c=0$ °С и при  $T_c=80$ °С становятся недопустимыми от 90К до 568К (за исключением случая  $T_{cv}=2700$  К и  $T_c=0$ °С, где  $\Delta T_{cv}=24$  К).

Такие зависимости для белых СД связаны с характеристиками цветных кристаллов (их структуры, технологии выращивания и т.д.), входящих в их состав.

В таблице 10 приведены значения коэффициента  $a_{cv}$  от температуры на поверхности кристаллов.

Зависимость  $a_{cv}$  от температуры на поверхности кристаллов. Таблица 10.

№ СД/ $T_c$ , °C		$T_{цв}$ , К					
		2700	3500	4000	5000	5700	6500
1	0°C	0,33	0,489	0,581	0,73	0,814	0,901
	25°C	0,327	0,483	0,573	0,716	0,8	0,885
	80°C	0,324	0,476	0,564	0,706	0,785	0,868
2	0°C	0,341	0,495	0,581	0,722	0,811	0,889
	25°C	0,367	0,529	0,618	0,76	0,856	0,934
	80°C	0,361	0,519	0,605	0,747	0,834	0,913
3	0°C	0,342	0,494	0,581	0,722	0,821	0,889
	25°C	0,369	0,526	0,617	0,76	0,856	0,934
	80°C	0,362	0,516	0,603	0,744	0,841	0,909

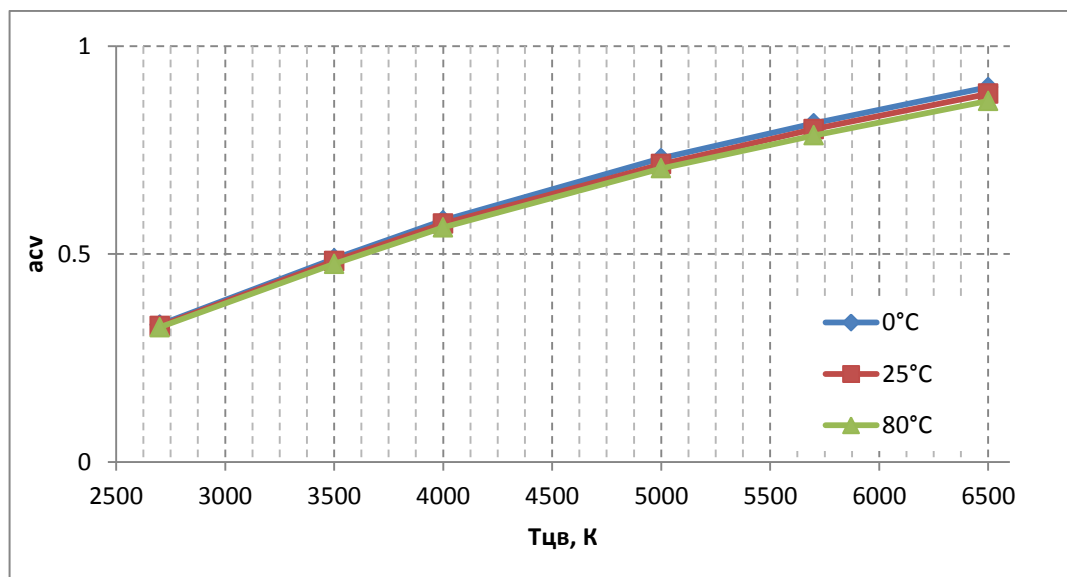


Рис. 65. Зависимость  $a_{cv}$  от  $T_c$  для СД №1.



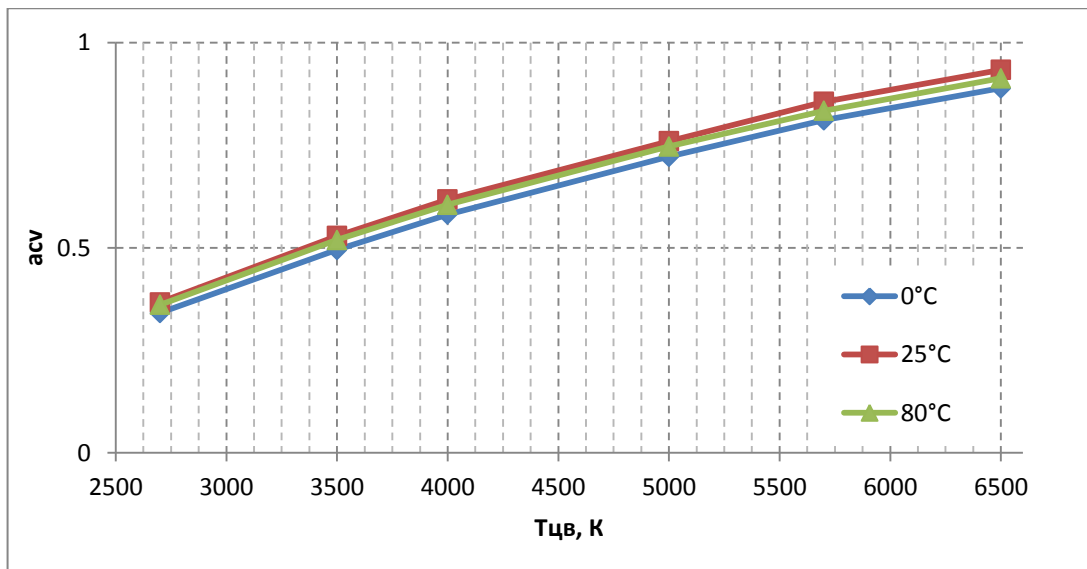


Рис. 66. Зависимость  $a_{cv}$  от  $T_c$  для СД№2.

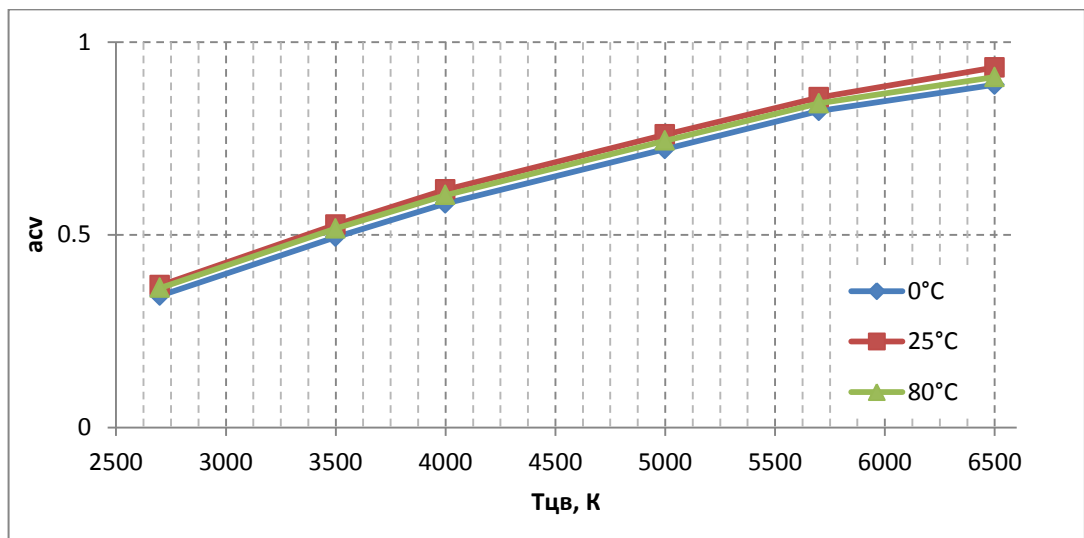


Рис. 67. Зависимость  $a_{cv}$  от  $T_c$  для СД№3.

Из представленных графиков видно, что:

1. Температура на поверхности кристаллов незначительно влияет на значения коэффициента  $a_{cv}$ .
2. Для СД№1 с ростом  $T_c$  значения коэффициента  $a_{cv}$  падают.
3. Для СД№2 и СД№3 наибольшие значения  $a_{cv}$  получены при  $T_c=25^\circ\text{C}$ , а наименьшие при  $T_c=0^\circ\text{C}$ .

### 3.4. Влияние цветовой температуры на световую отдачу белого СД

Световая отдача является важной характеристикой светодиодов видимого спектра, отражающей эффективность их работы [11]. В таблице 11 представлены значения световой отдачи в зависимости от Тцв.

Зависимость  $\eta_v$  от Тцв. Таблица 11.

№ СД	Тцв, К					
	2700	3500	4000	5000	5700	6500
1	13	12	11	10	10	9
2	46	45	44	43	42	42
3	49	47	45	43	42	42

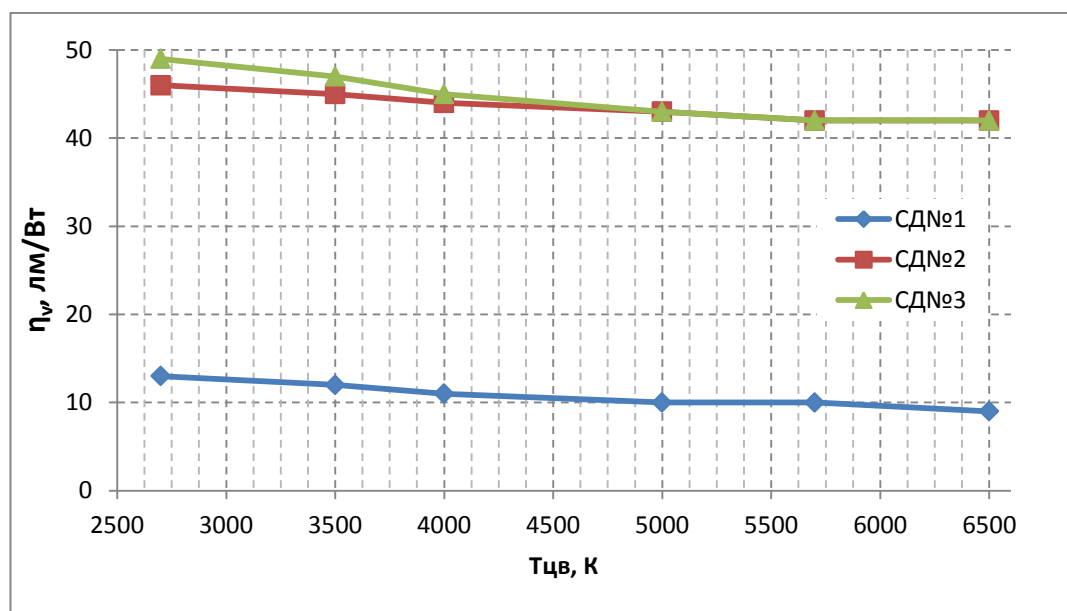


Рис. 68. Зависимость  $\eta_v$  от Тцв.

Из графика видно, что с увеличением Тцв значение световой отдачи падает. Это объясняется тем, что с ростом Тцв доля синего излучения начинает возрастать, а красного излучения - уменьшаться. И поскольку световая отдача синих кристаллов ниже чем у остальных кристаллов, это приводит к уменьшению значения общей световой отдачи белого многокристального СД.

### 3.5. Влияние возраста человека на восприятие им излучения белого СД

С возрастом ухудшается пропускная способность хрусталика глаза. Хрусталик постепенно желтеет, что приводит к низкому пропусканию у пожилых людей особенно в короткой области длин волн. На рис. 69 представлены зависимости пропускающей способности хрусталика от возраста человека.

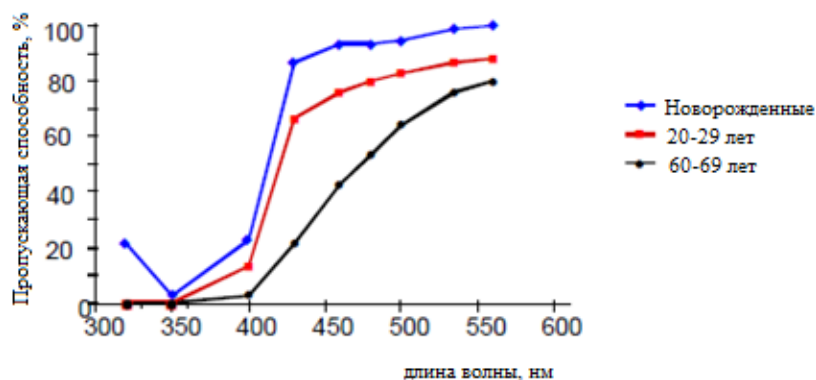


Рис. 69. Зависимость пропускающей способности хрусталика от длины волны для разных возрастных групп.

Для определения изменения восприятия излучения белого СД от возраста человека воспользуемся программой Program\_4, интерфейс которой представлен на рис. 70.

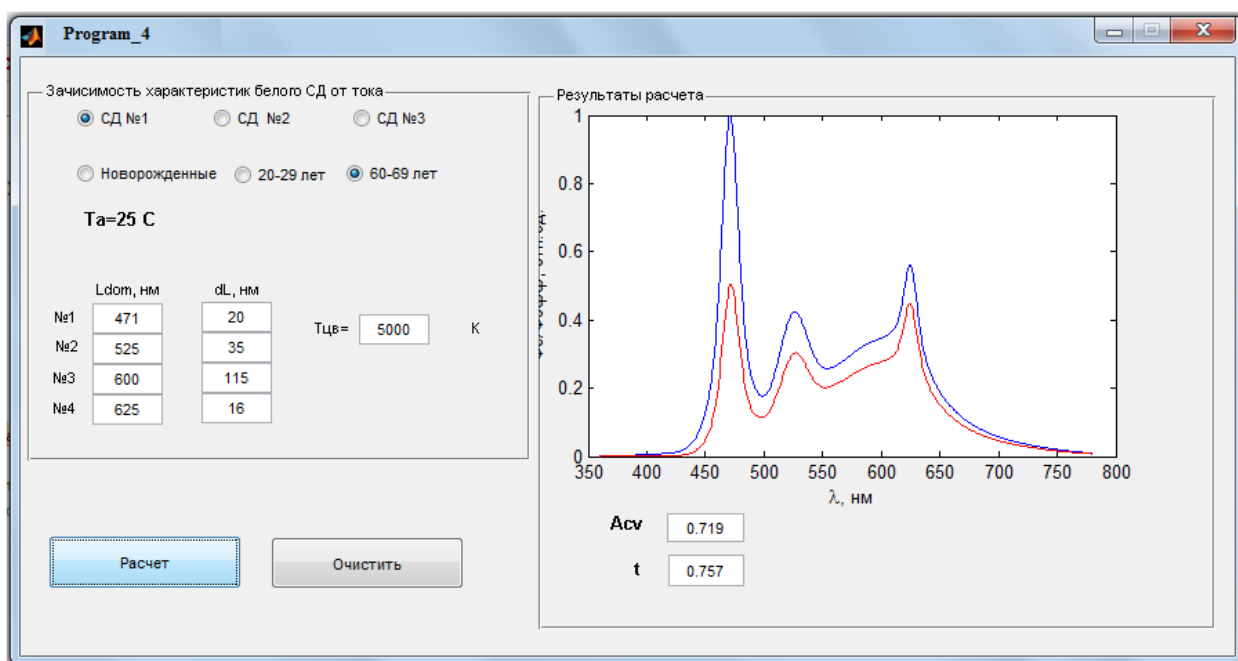


Рис. 70. Вид программы. Синяя кривая - исходное излучения белого СД, красная кривая - излучение, воспринимаемое человеком, выбранной возрастной группы.

Программа позволяет:

- рассчитать коэффициент циркадной эффективности и интегральный коэффициент пропускания хрусталика для разных возрастных групп и Тцв.
- визуально оценивать различие между спектром исходного белого СД и спектром, воспринимаемым человеком, выбранной возрастной группы.

В таблице 12 представлены значения  $a_{cv}$  в зависимости от возраста человека.

Зависимость  $a_{cv}$  от возраста человека. Таблица 12.

№ СД		Тцв, К					
		2700	3500	4000	5000	5700	6500
1	Новорожденные	0,314	0,464	0,551	0,682	0,77	0,852
	20-29 лет	0,295	0,436	0,518	0,65	0,724	0,801
	60-69 лет	0,242	0,353	0,418	0,521	0,578	0,64
2	Новорожденные	0,338	0,488	0,571	0,705	0,79	0,865
	20-29 лет	0,317	0,456	0,532	0,654	0,733	0,801
	60-69 лет	0,257	0,357	0,41	0,491	0,547	0,59
3	Новорожденные	0,355	0,504	0,59	0,725	0,826	0,89
	20-29 лет	0,333	0,471	0,55	0,673	0,766	0,824
	60-69 лет	0,27	0,368	0,424	0,506	0,571	0,608

Данные в таблице 12 представлены на рис. 71-73.

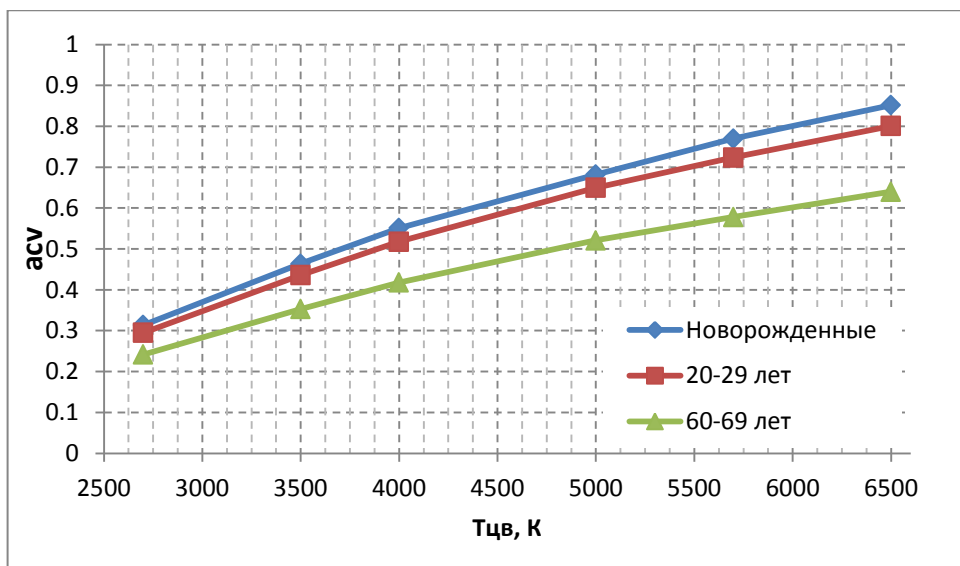


Рис. 71. Зависимость  $a_{cv}$  от возраста человека (СД№1).

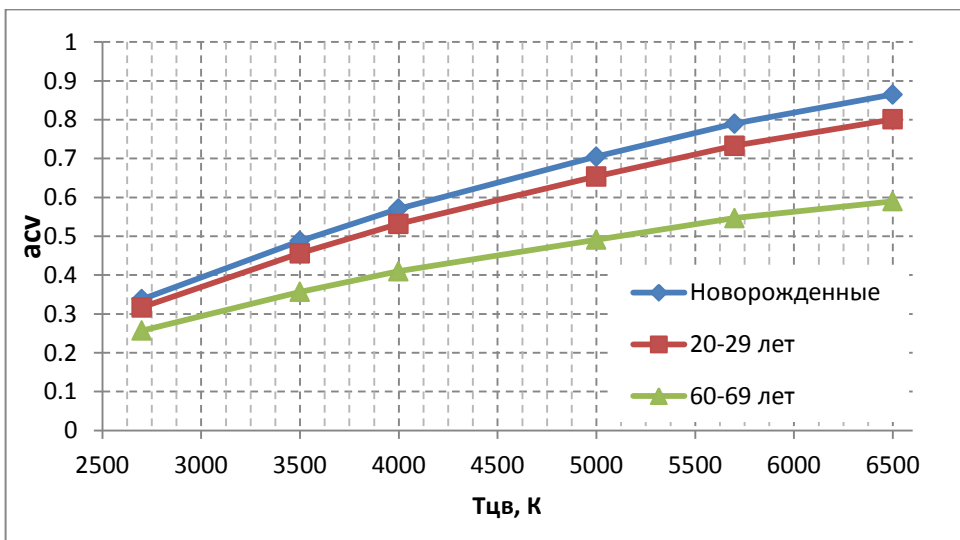


Рис. 72. Зависимость  $a_{cv}$  от возраста человека (СД№2).

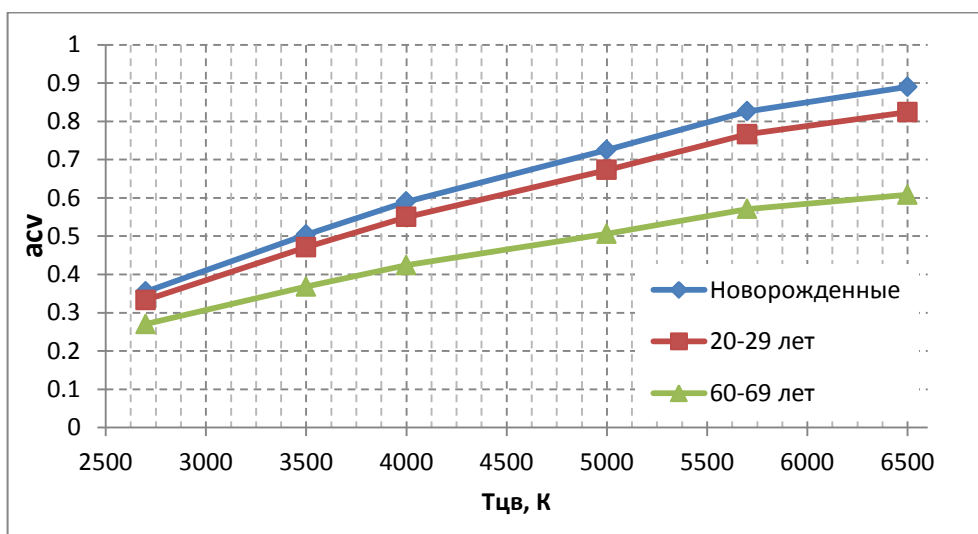


Рис. 73. Зависимость  $a_{cv}$  от возраста человека (СД№3).

Из приведенных графиков видно, что:

1. С увеличением возраста значение  $a_{cv}$  уменьшается. Это объясняется тем что, кривая относительной циркадной эффективности распределена в коротковолновой части спектра с максимумом в диапазоне 460-464 нм, в то время как пропускающая способность хрусталика с возрастом уменьшается, особенно в коротковолновой части спектра.

2. Значения коэффициента  $a_{cv}$  для новорожденных и молодых людей в возрасте 20-29 лет очень близки.

В таблице 13 представлены значения интегрального коэффициента пропускания хрусталика  $t$  от возраста человека.

Зависимость интегрального коэффициента  $t$  от возраста. Таблица 13.

№ СД		Тцв, К					
		2700	3500	4000	5000	5700	6500
1	Новорожденные	0,995	0,994	0,993	0,992	0,991	0,99
	20-29 лет	0,887	0,883	0,881	0,878	0,877	0,875
	60-69 лет	0,775	0,767	0,763	0,757	0,754	0,75
2	Новорожденные	0,994	0,993	0,992	0,991	0,991	0,99
	20-29 лет	0,886	0,882	0,88	0,878	0,876	0,875
	60-69 лет	0,773	0,765	0,762	0,758	0,754	0,752
3	Новорожденные	0,994	0,993	0,992	0,991	0,99	0,99
	20-29 лет	0,885	0,881	0,879	0,877	0,875	0,875
	60-69 лет	0,771	0,764	0,76	0,756	0,752	0,751

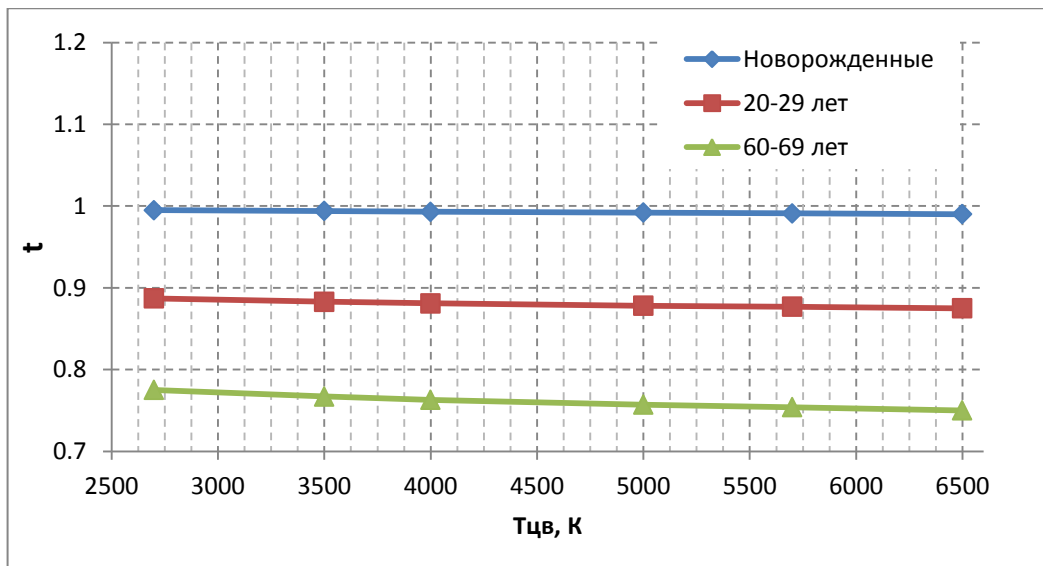


Рис. 74. Зависимость  $t$  от возраста человека (СД№1).

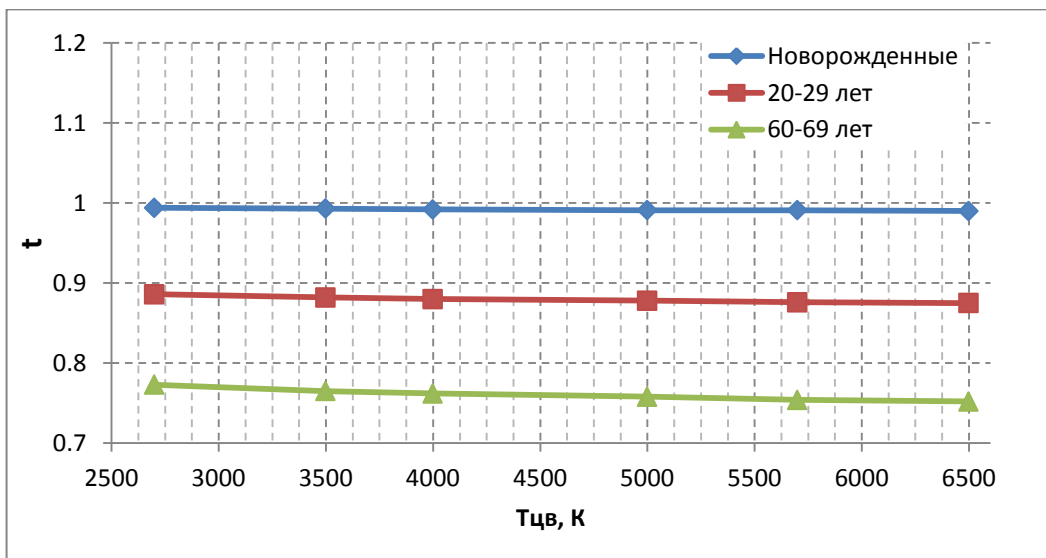


Рис. 75 . Зависимость  $t$  от возраста человека (СД№2).

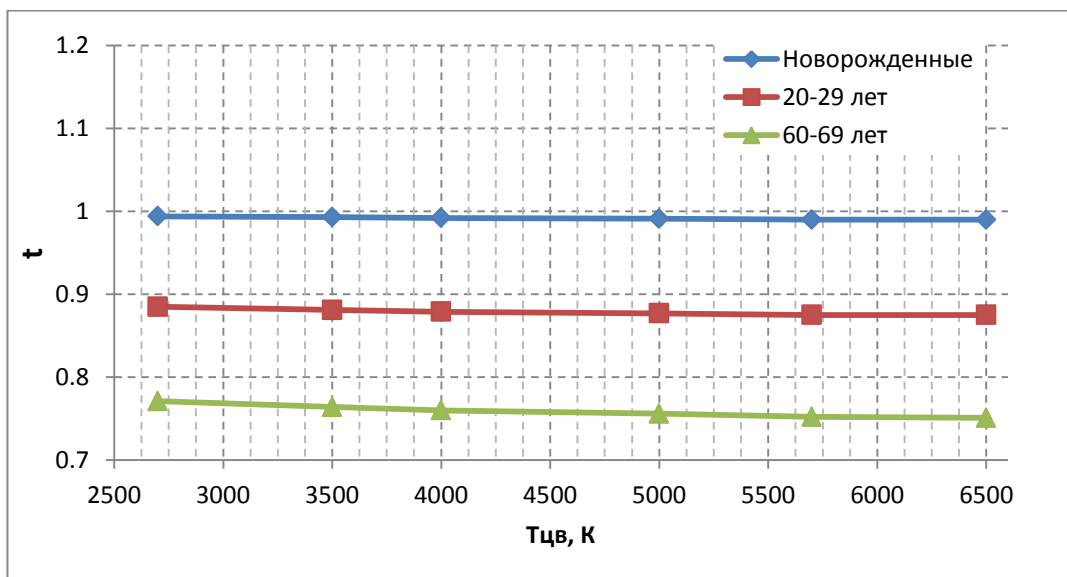


Рис. 76. Зависимость  $t$  от возраста человека (СД№3).

Из представленных графиков видно, что:

1. С увеличением возраста интегральный коэффициент пропускания хрусталика  $t$  уменьшается. Это связано с тем что с увеличением возраста спектральный коэффициент пропускания хрусталика  $\tau(\lambda)$  уменьшается, что приводит к уменьшению восприятия пожилым человеком излучения (см. рис. 70).

2. Изменение  $T_{цв}$  не приводит к значительному изменению интегрального коэффициента пропускания хрусталика  $t$ . При этом изменение  $t$  для новорожденных детей наблюдается только в третьем знаке после запятой, а у пожилых людей это изменение составляет 3-4%.



## Выводы.

При оценке цветопередачи белых светодиодных источников света метод шкалы цветности оказывается более соответствующим особенностям такого ИС, чем стандартный метод индексов цветопередачи, и его использование более целесообразно. Метод шкалы цветности хорошо отражает избирательность белых СД в цветопередаче образцов с различными значениями тона и насыщенности.

Четырёхкристальные белые СД по значению общего индекса цветопередачи и индекса шкалы цветности подходят для применения в ОУ с высокими требованиями к качеству освещения.

Наилучшая цветопередача  $R_a=92$ ,  $Q_a=90$  была получена для белых СД на основе 3, 6, 4 и 2 кристалла (значения  $\lambda_{\max}$  и  $\Delta\lambda_{0,5}$  - 471 нм и 20 нм, 525 нм и 35 нм, 600 нм и 115 нм, 625 нм и 16 нм соответственно) при  $T_{\text{цв}}=2700$  К.

Чтобы изменение цветовых характеристик белого излучения не превышало допустимых значений ( $\pm 50$  К), для этих ИС должны выполняться следующие требования по току и температуре на поверхности кристаллов.

По температуре на поверхности кристалла при номинальном  $T_c=25^\circ\text{C}$ :

- для СД№1: при  $T_{\text{цв}} < 5000$  К  $T_c = 0-80^\circ\text{C}$ , при  $T_{\text{цв}} > 5000$  К  $T_c = 14-50^\circ\text{C}$ ;

- для СД№2 и СД№3: при  $T_{\text{цв}} < 5000$  К  $T_c = 10-35^\circ\text{C}$ , при  $T_{\text{цв}} > 5000$  К  $T_c = 20-30^\circ\text{C}$ .

По току:

- для СД№1: при  $T_{\text{цв}} = 2700$  К  $I_f = 1-100$  мА, при  $T_{\text{цв}} = 4000$  К  $I_f = 1-60$  мА, при  $T_{\text{цв}} = 5000$  К  $I_f = 10-50$  мА, при  $T_{\text{цв}} = 6500$  К  $I_f = 15-30$  мА при номинальном значении  $I_f = 20$  мА;

- для СД№2: при  $3500 < T_{\text{цв}} < 5000$  К  $I_f = 400-900$  мА, при  $T_{\text{цв}} > 5000$  К  $I_f = 600-800$  мА, при номинальном значении  $I_f = 700$  мА;

- для СД№3: при  $2700 < T_{\text{цв}} < 5700$  К  $I_f = 250-1000$  мА, при  $T_{\text{цв}} > 5700$  К  $I_f = 300-700$  мА, при номинальном значении  $I_f = 350$  мА.

Также следует обратить внимание на то, что увеличение тока, проходящего через СД, приводит к сокращению срока службы белого СД.

При проектировании динамичных ОУ следует учитывать то, что с ростом  $T_{цв}$  возрастает значение  $a_{cv}$ , но при этом уменьшается световая отдача белых многокристальных СД и снижаются значения общего индекса цветопередачи и индекса шкалы цветности. Также важным является определение возрастных групп людей, находящихся в помещении, для их комфортного и длительного пребывания в нем, и дальнейшая корректировка спектра излучения источников света, связанная с возрастными изменениями органа зрения человека.

Список литературы:

1. <http://biobib.ru/index.php/anatomiya/anatomiya-cheloveka/stroenie-i-funkcii-organa-zreniya.html>
2. <http://biobib.ru/index.php/anatomiya/anatomiya-cheloveka/zritelnie-analizator.html>
3. Косицкий Г.И. "Физиология человека", 1985 г., Москва, изд. "Медицина".
4. Henri Jules, "The effect of light on well-being "
5. Ir W J M van Bommel and Ir G J van den Beld, "Lighting for work: visual and biological effects", Philips Lighting, april 2003.
6. Stephen M. Pauley, "Lighting for the human circadian clock. recent research indicates that lighting has become a public health issue."
7. Henri Jules, " Dynamic Lighting and human performance"
8. Д. В. Архангельский, В. Ю. Снетков "Исследования влияния света на циркадные ритмы человека", Вестник МЭИ, 2012 г., Москва
9. А. Войтысяк, Ц. Лю, "Биологическое действие освещения – традиционного и светодиодами", журнал Светотехника, 2013, №2.
10. Henri Jules, " The ageing workforce – is lighting the solution? "
11. Ф.Е. Шуберт. «Светодиоды» - Москва, Физматлит, 2008 год.
12. А. Берг, П. Дин. «Светодиоды» - Издательство «Мир», Москва, 1979 год.
13. [Юрий Медведев](#), [Кирилл Борисов](#). «Ледниковый период», [1\(3\)-2003](#).
14. <http://www.transistor.ru/press>
15. [http://www.lighting.philips.ru/lightcommunity/trends/led/anatomy/history\\_of\\_led.wpd](http://www.lighting.philips.ru/lightcommunity/trends/led/anatomy/history_of_led.wpd)
16. <http://getfr2.no-ip.org/pub/dc/doc/1.htm>
17. <http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/doc/led/1.htm>
18. [http://leds-magazine.ru/belie\\_svetodiodi.html](http://leds-magazine.ru/belie_svetodiodi.html)

19. Т. С. Круглова «Исследование параметров и характеристик белых светоизлучающих диодов, применяемых в системах автоматизированного управления» магистерская диссертация, 2011 г.
20. Зак П.П., Островский М.А, «Потенциальная опасность освещения светодиодами для глаз детей и подростков», журнал Светотехника, 2012 год, № 3.
21. «Основы психофизиологии», М. ИНФРА-М, 1998, с.57-72, Глава 2  
Отв. ред. Ю.И. Александров
22. Д. Джадд, Г. Вышецки, «Цвет в науке и технике», изд. Мир, 1978 г.
23. ГОСТ Р 54814-2011. Светодиоды и светодиодные модули для общего освещения. Термины и определения.
24. Хьюбел Д. Х., «Глаз, мозг, зрение», издательство «Мир», 1990 г.
25. Айзенберг Ю.Б. «Справочная книга по светотехнике» – М.: Знак, - 2006. – 972с.
26. W. Davis, Y. Ohno «Color rendering of Light Sources»,  
<http://physics.nist.gov>
27. *Brainard, G.C., Hanifin, J.P., Greason, J.M., Byrne, B., Glickman, G.L., Gerner, E., Rollag, M.D.* Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor // *J. Neuroscience*, 2001, v. 21 p. 6405–6412.
28. *Thapan, K., Arendt, J., Skene, D.J.* An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans // *J. Physiol.* – 2001. – Vol. 535, № 1. – P.261–267.
29. А.В. Леонидов, "О фотоприёмниках тракта управления циркадной ритмикой организма человека", журнал Светотехника, 2011, №3.
30. Елисеев Н.П., Решёнов С.П. «О предельных световых и цветовых характеристиках белых светодиодов», журнал Светотехника, 2012, №4.
31. [http://www.nichia.co.jp/ru/about\\_nichia/index.html](http://www.nichia.co.jp/ru/about_nichia/index.html)
32. [http://www.osram.ru/osram\\_ru/](http://www.osram.ru/osram_ru/)

33. ГОСТ 23198-94. Лампы электрические. Методы измерения спектральных и цветовых характеристик.
34. К. Бартенбах, "Свет и здоровье", журнал Светотехника, 2009, №2.
35. Г. Бизяк, М. Кланичек-Гунде, М.Б. Кобав, К. Маловр-Ребек "Спектры излучения и фотобиологическое действие светодиодов", журнал Светотехника, 2013, №2.
36. СП 52.13330.2011 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95\*.
37. С. Никифоров, "Температура в жизни светодиодов. Часть 1.", журнал Компоненты и технологии, №9, 2005.
38. А. Л. Закгейм, "Светодиодные системы освещения: энергоэффективность, зрительное восприятие, безопасность для здоровья (обзор)", журнал Светотехника, 2009, №2.

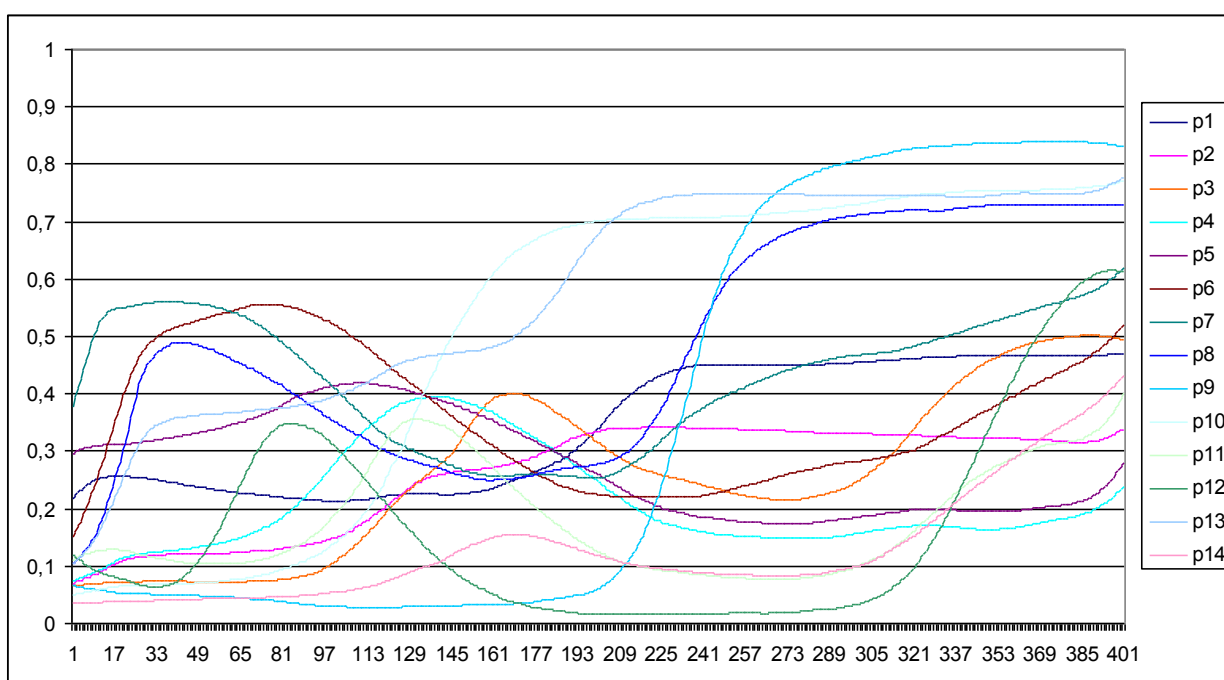
## Приложение.

Обозначения в атласе Манселла отражающих образцов, используемых для оценки цветопередачи в методах CRI и CQS.

Таблица 1. Обозначения в атласе Манселла.

№ образца	CRI	CQS
1	7.5 R 6 / 4	7.5 P 4 / 10
2	5 Y 6 / 4	10 PB 4 / 10
3	5 GY 6 / 8	5 PB 4 / 12
4	2.5 G 6 / 6	7.5 B 5 / 10
5	10 BG 6 / 4	10 BG 6 / 8
6	5 PB 6 / 8	2.5 BG 6 / 10
7	2.5 P 6 / 8	2.5 G 6 / 12
8	10 P 6 / 8,	7.5 GY 7 / 10
9	4.5 R 4 / 13	2.5 GY 8 / 10
10	5 Y 8 / 10	5 Y 8.5 / 12
11	4.5 G 5 / 8	10 YR 7 / 12
12	3 PB 3 / 11	5 YR 7 / 12
13	5 YR 8 / 4	10 R 6 / 12
14	5 GY 4 / 4	5 R 4 / 14
15		7.5 RP 4 / 12

Спектральные коэффициенты отражения образцов, используемых в  
- методе CRI



- методе CQS

