

Об эффективности освещения светодиодами по зрительной работе

С.А. АМЕЛЬКИНА, О.Е. ЖЕЛЕЗНИКОВА, Л.В. СИНИЦЫНА

МГУ им. Н.П. Огарева, Саранск
E-mail: sarstf@mail.ru

Аннотация

Экспериментально установлено, что освещение светодиодами не вызывает негативного воздействия на орган зрения и организм человека в целом. Показано, что происходящие при выполнении зрительных работ изменения функциональных показателей органа зрения входят в соответствующие границы физиологических колебаний и имеют обратимый характер. Оценены интегральные показатели эффективности освещения светодиодами по зрительной работоспособности и степени зрительного утомления. Показана практическая значимость полученных результатов.

Ключевые слова: освещение светодиодами, комплексная методика, экспериментальная исследовательская установка, зрительные функции, зрительное утомление, зрительная работоспособность, эффективность освещения.

Светодиоды (СД) расширили технические возможности создания ОУ с существенно улучшенными энергетическими и эксплуатационными характеристиками. В современной нормативной документации по освещению СД рассматриваются как рекомендуемые к применению в производственных помещениях, общественных зданиях и общедомовых помещениях жилых зданий. При этом возрастает интерес и к медико-биологическим аспектам новых светодиодных технологий [1]. Возможность использования СД для создания благоприятных условий освещения требует весомых доказательств, которые могут быть получены лишь всесторонними исследованиями влияния освещения СД (ОСД) на орган зрения и организм в целом. При этом существенны вопросы как непосредственной опасности поражения органов зрения излучением СД, так и возможных последствий длительного действия ОСД на психофизиологическое и физическое здоровье людей.

Цель данной работы – оценка влияния ОСД на орган зрения и показатели эффективности зрительной работы.

Важным этапом в достижении цели явилось создание экспериментальной исследовательской установки общего освещения (ЭИУ), в лаборатории № 316 Института электроники и светотехники МГУ им. Н.П. Огарёва. Лаборатория включает четыре помещения: одно (с коэффициентами отражения потолка, стен и пола 0,7, 0,5 и 0,3) – для обследования наблюдателей и три – для экспериментальных исследований (в двух из них смонтированы ОУ с СД, а третьем – ОУ с ЛЛ) (рис. 1). При сравнении вариантов освещения в качестве базовой использовалась ОУ с ЛЛ¹.

Для ЭИУ, в соответствии с требованиями [2], были выбраны светильники с СД *Cap Flat 66–16*² и ДВО 12–38–001 *Prizma*³ и светильники с ЛЛ ЛВО 04–4×14–041 *PRS*, 3. Значения коррелированной цветовой температуры светильников $T_{\text{кц}} = 3000, 4000$ и 5000 К. В Центре коллективного пользования «Светотехническая метрология»

МГУ им. Н.П. Огарева были измерены фотометрические и спектроколориметрические параметры отобранных светильников. На рис. 2–5 приведены спектры их излучения, кривые силы света и значения индекса цветопередачи R_a .

Варианты освещения предварительно были смоделированы в программе «*DIALux*» с целью выполнения известных требований [3] (рис. 6). Изменение освещённости на рабочей поверхности E достигалось, соответственно, использованием ПРА и устройств управления, регулируемых по протоколу «*DALI*». Исследования проводились при трёх уровнях E : 200, 400 и 1000 лк.

Использовалась разработанная нами комплексная методика оценки влияния условий ОСД на показатели состояния органа зрения и организма человека в целом [4].

Анализ существующих методик определил выбрать наиболее адекватные поставленной задаче – оценке эффективности условий ОСД при выполнении зрительно-напряжённых работ. Так, изменения функционального состояния органа зрения оценивались на основании исследований: аккомодационно-мышечного и рецепторного аппаратов органа зрения; центрального звена органа зрения.

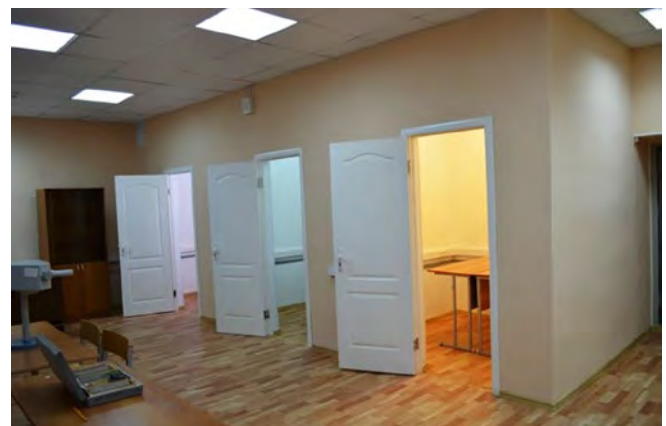
Перед началом исследований группа студентов-добровольцев в возрасте 20–25 лет прошла обследование в Республиканской офтальмологиче-

¹ Так как ЛЛ – одни из самых обследованных ИС массового применения по психофизиологическому и гигиеническому воздействиям их излучения на организм.

² Производитель – российско-корейская компания (ООО) «Непес Рус» (с СД собственного производства).

³ Производитель – ОАО «Ардатовский светотехнический завод» (с СД производства *Seoul Semiconductor*).

Рис. 1. Помещения для обследования и проведения экспериментальных исследований



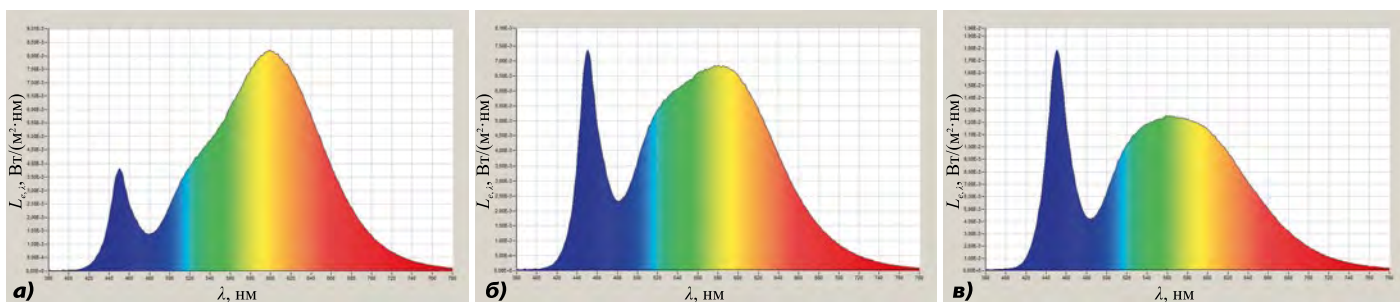


Рис. 2. Спектры излучения светильников *Cap Flat 66–16* с $T_{кц}$ 3000 К (а), *Cap Flat 66–16* с $T_{кц}$ 4000 К (б) и ДВО 12–38–416 с $T_{кц}$ 5000 К (в)

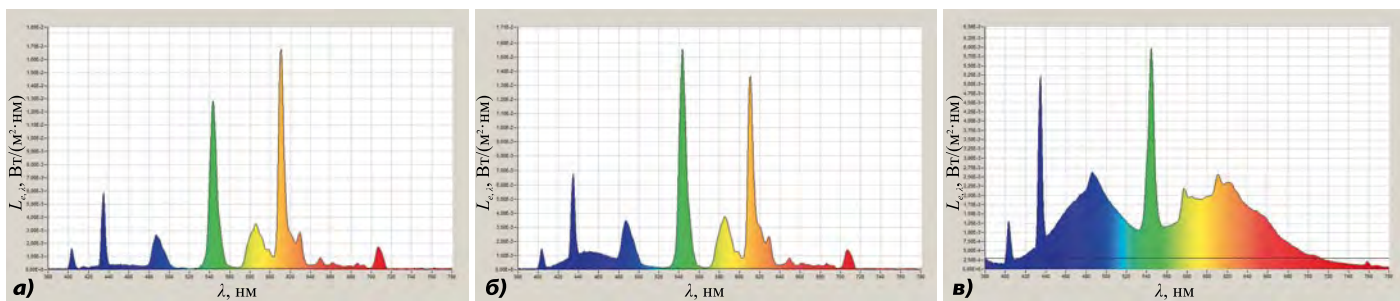


Рис. 3. Спектры излучения светильников ЛВО 04–4×14–041 PRS с ЛЛ T5 FH 14W HE ($T_{кц}$ 3000 К) производства *Osram* (а), ЛВО 04–4×14–041 PRS с ЛЛ Master TL5 HE14W ($T_{кц}$ 4000 К) производства *Philips* (б) и ЛВО 04–4×18–041 PRS с ЛЛ T5 L 18W ($T_{кц}$ 5000 К) производства *Osram* (в)

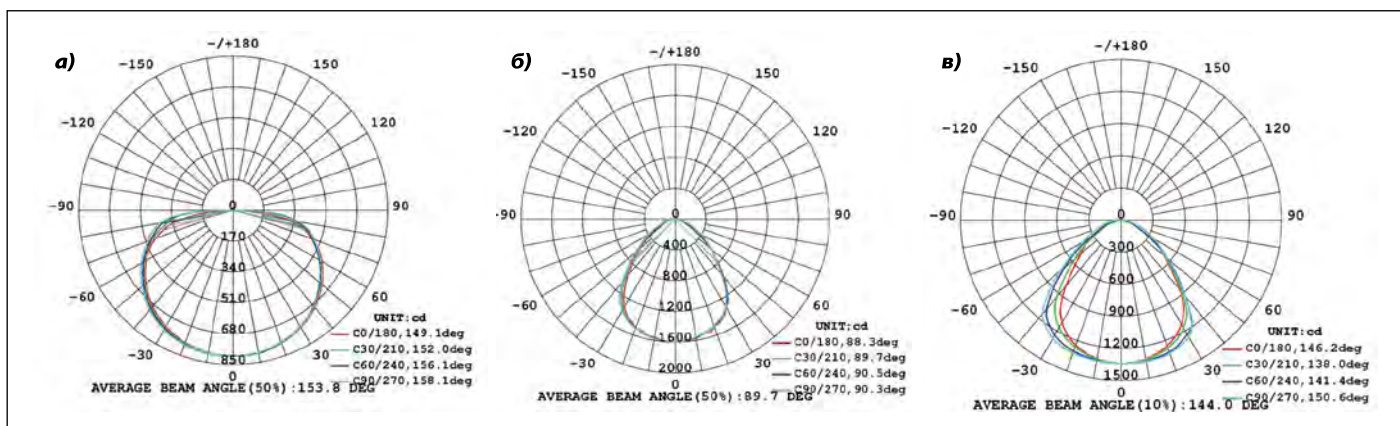


Рис. 4. КСС светильников *Cap Flat 66–16* (а), ДВО 12–38–001 (б) и ЛВО 04–4×14–041 PRS с ЛЛ T5 (в) в четырёх меридиональных плоскостях

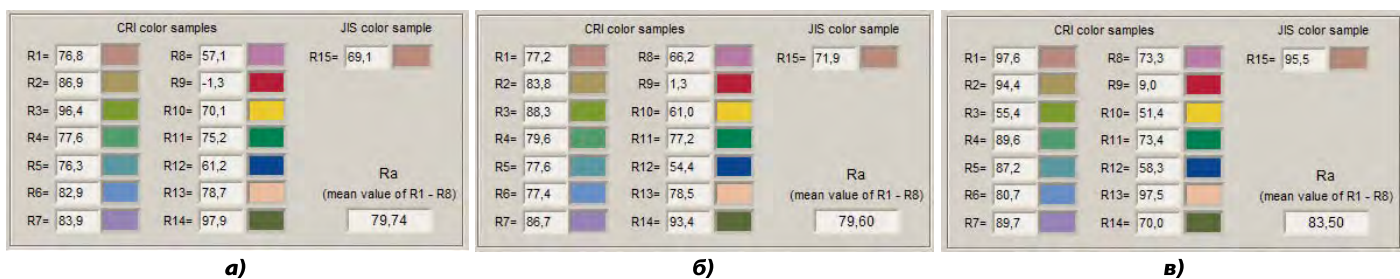


Рис. 5. Индексы цветопередачи светильников *Cap Flat 66–16* (а), ДВО 12–38–001 (б) и ЛВО 04–4×14–041 PRS с ЛЛ T5 Master TL5 HE14W ($T_{кц}$ 4000 К) *Philips* (в)

ской больнице Саранска. Оно включало определение рефракции и остроты зрения и компьютерную томографию сетчатки глаз. У всех отобранных наблюдателей были: рефракция преимущественно эметропическая; острота зрения на оба глаза 1,0 и цветоощущение без патологии.

Отобранные наблюдатели в количестве 60 человек были случайным образом разбиты на две группы по 30 человек: контрольная – эксперимент при освещении ЛЛ (ОЛЛ) – и основная – эксперимент при ОСД. Число наблюдателей и количество экспериментов определялись исходя из требований

получения статистически достоверных данных и регламентации времени проведения исследований. Были составлены план эксперимента и графики работы каждой группы, учитывающие суточные биоритмы человека. Функциональной нагрузкой служила полтора часовая зрительно-напряжён-

Рис. 6. Моделирование освещения помещений для экспериментальных исследований (в «DIALux»)



ная работа корректорского типа с бу-
мажными текстами, включая расчёт
площадей криволинейных фигур (ум-
ственная компонента).

Во всех исследованных вариантах
освещения показатели качества осве-
щения не превышали нормируемых
значений [3]: объединённый показа-
тель UGR составлял 10–14, а коэф-
фициент пульсации освещённости –
0,2–0,6 %.

Перед началом исследований все
наблюдатели прошли 10-дневную тре-
нировку по методикам исследований,
достаточную для получения стабиль-
ных результатов.

По окончании исследований кон-
трольная и основная группы наблю-
дателей прошли повторное обследо-
вание в Республиканской офтальмо-
логической больнице Саранска, чтобы
определить, не вызывает ли ОСД не-
гативное воздействие на орган зре-
ния.

План эксперимента предусматри-
вал при заданных условиях освеще-
ния измерения до и после выполне-
ния зрительных работ объёма абсо-
лютной аккомодации (ОАА), времени
ахроматической адиспароии, крити-
ческой частоты слияния мельканий
(КЧСМ) (на компьютерном комплексе
КПФК-99 «Психомат») и артериально-
го давления. В конце работы наблю-
датель заполнял личную анкету субъ-
ективной оценки условий освещения⁴.

Кроме того, перед выполнением
зрительно-напряжённой работы и по
её окончании у наблюдателей изме-
рились монокулярно пороги цвето-
различения (с помощью аномалоско-
па АН-59) и проекции слепого пятна
органа зрения (по методу кампиме-
трии) [5].

Обследования органа зрения

Исследования показали уменьше-
ние ОАА при выполнении зритель-
но-напряжённой работы во всех рас-
сматриваемых вариантах освещения
(табл. 1 и 2).

Определение, по t -критерию Стю-
дента с $p < 0,05$, достоверности изме-
нений ОАА в результате зрительной
нагрузки показало, что практически
во всех вариантах освещения сдвиги
в значениях ОАА достоверны и не
переходят границ естественных ва-
риаций этого показателя аккомодатив-
ной функции органа зрения (0,5–
1,5 дптр).

Влияние спектрального состава
на изменение рассматриваемого по-
казателя аккомодации при постоян-
ной E по t -критерию Стюдента вы-
явлено при $T_{\text{кц}}$ 4000 К и всех уров-
нях E , а при $T_{\text{кц}}$ 5000 К только при
 E 200 и 400 лк. Наибольшие значе-
ния ОАА зафиксированы при ОСД.
Превышение ОАА после работы при
ОСД по сравнению с базовым вари-
антом освещения (ОЛЛ) при $T_{\text{кц}}$ 4000
К и E 200–1000 лк составило 0,6–0,7
дптр (6,3–8,4 %), а при $T_{\text{кц}}$ 5000 К и E
200–400 лк – 0,5–0,7 дптр (6,0–8,0 %).
То есть установлено, что орган зрения
лучше аккомодирует при ОСД (при $T_{\text{кц}}$
4000 и 5000 К), что объясняется боль-
шей активностью цилиарной мышцы
и, видимо, связано со спектром излу-
чения СД [6].

Влияние $T_{\text{кц}}$ при постоянной E на
время ахроматической адиспароии
при работе в сравниваемых вариан-
тах весьма существенно. Время ахро-
матической адиспароии как до, так
и после работы оказалось более про-
должительным при ОСД. Это показы-

вает, что ОСД создаёт более благопри-
ятные условия для работы аккомодаци-
онно-мышечного аппарата органа
зрения, чем ОЛЛ.

При оценке состояния сетчатки по
показателям компьютерной томогра-
фии было установлено, что по окон-
чании эксперимента у наблюдателей
обеих групп (контрольной и основ-
ной) сохранился профиль фовеолы
и не нарушена архитектура сетчат-
ки. При этом статистическая обработ-
ка результатов обследования не выяви-
ла статистически значимых различий
между исследуемыми показателями
($p > 0,05$ по t -критерию Стюдента);
то есть состояние сетчатки наблю-
дателей осталось без достоверных из-
менений.

Исследование площади проекции
слепого пятна показало, что ретиналь-
ное утомление, оценённое по состоя-
нию периферического зрения, приво-
дит к достоверному увеличению фи-
зиологической площади слепого пятна
после выполнения напряжённой зри-
тельной работы. Диапазон увеличения
проекции диска зрительного нерва по
отношению к исходному для вариан-
тов ОЛЛ составил 6,57–12,06 %, а для
вариантов ОСД – 3,87–10,77 %. Со-
поставление динамики исследуемого
показателя указало, что при $T_{\text{кц}}$ 3000
К ОСД способствует меньшему зри-
тельному утомлению (ЗУ), чем ОЛЛ
($p < 0,05$).

В ходе эксперимента установлен
неодинаковый характер изменения
порогов цветоразличения при разных
вариантах освещения. Из полученных
результатов следует – при зритель-
ной работе в условиях ОЛЛ и ОСД
функциональное состояние сетчатки
не было одинаковым, что, очевидно,
связано с фотохимическими реакци-
ями в сетчатке, которые могут тормо-
зиться и усиливаться под действием
излучений в разных частях видимого
спектра. Влияние излучения СД вы-
явлено только на s -рецептор сетчатки
при $T_{\text{кц}}$ 4000 К и E 1000 лк и при $T_{\text{кц}}$
5000 К и E 400, 1000 лк ($p < 0,05$). Для
других вариантов освещения влияние
излучения ИС на k -, z -, s -рецепторы
оказалось незначительным, что может
быть объяснимо характером зритель-
ных задач – работа с ахроматически-
ми объектами.

Исследования состояния централь-
ного звена органа зрения до и после
работы по методу КЧСМ не позволи-
ли выявить наиболее предпочтитель-

⁴ Специально разработанная анкета субъективной оценки с вопросами по основным характеристикам варианта освещения (ОЛЛ или ОСД), цветопередающим свойствам излучения и психоэмоциональному состоянию наблюдателя.

Изменение ОАА после зрительной нагрузки при разных вариантах ОСД

E, лк	T _{кц} , К	До работы		После работы		Коэффициент корреляции	
		ОАА, дптр, \bar{x}	Доверительный интервал, $t \cdot \sigma_{\bar{x}}$	ОАА, дптр, \bar{x}	Доверительный интервал, $t \cdot \sigma_{\bar{x}}$	r (между «до» и «после» работы)	p(r)
200	3000	8,70	0,10	8,40	0,21	0,75	< 0,05
400		9,00	0,21	8,80	0,12	0,85	<0,01
1000		9,90	0,16	9,70	0,19	0,73	<0,05
200	4000	9,40	0,13	9,00	0,16	0,66	
400		9,70	0,17	9,50	0,19	0,65	
1000		10,10	0,13	10,20	0,18	0,14	–
200	5000	9,30	0,11	8,70	0,15	0,79	<0,05
400		9,70	0,13	9,40	0,18	0,66	
1000		10,00	0,22	9,80	0,24	0,63	

Таблица 2

Изменение ОАА после зрительной нагрузки при разных вариантах ОЛЛ

E, лк	T _{кц} , К	До работы		После работы		Коэффициент корреляции	
		ОАА, дптр, \bar{x}	Доверительный интервал, $t \cdot \sigma_{\bar{x}}$	ОАА, дптр, \bar{x}	Доверительный интервал, $t \cdot \sigma_{\bar{x}}$	r (между «до» и «после» работы)	p(r)
200	3000	8,60	0,21	8,20	0,12	0,73	<0,01
400		8,80	0,20	8,60	0,10	0,69	<0,05
1000		9,60	0,14	9,40	0,10	0,74	<0,01
200	4000	8,80	0,14	8,30	0,16	0,69	<0,05
400		9,10	0,15	8,80	0,10	0,77	<0,01
1000		9,80	0,14	9,60	0,12	0,85	<0,001
200	5000	8,70	0,29	8,20	0,27	0,63	<0,05
400		9,10	0,17	8,70	0,23	0,83	<0,001
1000		9,70	0,10	9,40	0,07	0,72	<0,05

ный вариант освещения: *t*-критерий Стьюдента не подтвердил достоверности различий во всех исследованных диапазонах *E* и *T_{кц}*. Таким образом, установлено, что значения КЧСМ при ОСД и ОЛЛ едва различимы.

Результаты исследований показывают, что снижение КЧСМ в ходе эксперимента связано с выполняемой зрительно-напряжённой работой; этот процесс обратим – к началу следующего дня показатели восстанавливались до исходных значений. То есть ОСД не оказывало угнетающего дей-

ствия на состояние центральной нервной системы.

Определение интегральных показателей эффективности освещения светодиодами по зрительной работоспособности и зрительному утомлению

Зрительная работоспособность оценивалась по методу корректурных проб. При этом использовались специальные тесты – корректурные пробы, составленные из букв кириллицы

с помощью генератора случайных чисел, контраст тестов – отрицательный. Наблюдатели работали с тестами в течение двух минут – вычёркивали заданную букву, встречающуюся в определённых сочетаниях. По результатам теста рассчитывались коэффициент зрительной работоспособности *I*, учитывающий просмотренное в тесте количество знаков, и коэффициент качества, учитывающий правильно вычёркнутые знаки и допущенные ошибки [7]. Анализ результатов исследования показал преимущества

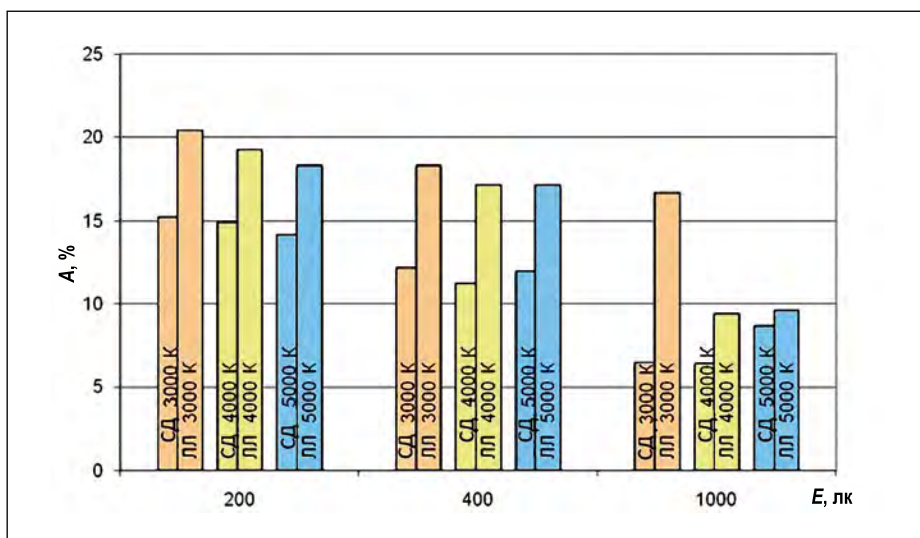


Рис. 7. Зрительное утомление (по методу ахроматической адиспарии)

ОСД в обеспечении большей зрительной работоспособности. Наибольшим значением I при ОСД оказалось при $T_{кц}$ 4000 K. Так, по сравнению с ОЛЛ оно при E 200, 400 и 1000 лк на 11,8, 14,9 и 12,4 %, соответственно, выше.

Полученный парный коэффициент корреляции r подтвердил ($p < 0,05$) наличие положительной взаимосвязи между ОАА и I после зрительной работы. Это позволило предположить, что определённый вклад в повышение I при ОСД вносила лучшая работа аккомодационно-мышечного аппарата.

Результаты исследования качества работы показали, что в процессе зрительной нагрузки его уровень снижался. Однако достоверность снижения коэффициента точности по t -критерию Стьюдента обнаружена лишь в условиях ОСД при $T_{кц}$ 4000 K (E 400 и 1000 лк) и $T_{кц}$ 5000 K (E 400 лк). Различия в качестве работы при сопоставлении вариантов ОСД и ОЛЛ оказались незначимыми.

ЗУ оценивалось по динамике временного порога ахроматической адиспарии.

При этом показатель ЗУ A рассчитывался как

$$A = \left(1 - \frac{t_j}{t_i}\right) \cdot 100\%,$$

где t_i и t_j – времена ахроматической адиспарии до и после зрительной работы, с, соответственно.

Результаты расчёта A (рис. 7) показали, что при ОСД в процессе 1,5-часовой зрительно-напряжённой работы

развивалось меньшее ЗУ. Наименьшее ЗУ при ОСД оказалось при $T_{кц}$ 4000, 5000 K и E 400 лк. Достоверность влияния $T_{кц}$ на ЗУ доказана во всех исследованных вариантах освещения с $p < 0,05$ по t -критерию Стьюдента.

Анализ интегральных показателей эффективности освещения по зрительной работоспособности показал, что условия ОСД способствовали обеспечению большей зрительной работоспособности и меньшего ЗУ.

Анализ полученных результатов достоверно показал, что ОСД не оказывает отрицательного (негативного) воздействия на орган зрения и показатели зрительной работоспособности (возрастная группа 20–25 лет). Исследования, выполненные при разных условиях освещения (ОСД и ОЛЛ), выявили как тесную связь функций зрения с компенсаторно-приспособительной реакцией организма, так и устойчивость адаптивных систем, ответственных за регуляцию чувствительности органа зрения и организма в целом. Результаты проведённых исследований могут использоваться для разработки практических рекомендаций по применению ОСД.

В заключение следует подчеркнуть, что работы по гигиенической оценке ОСД требуют продолжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Световая среда для человека: наука, промышленность и закон // Светотехника. – 2016. – № 1. – С. 45–49.
2. ГОСТ Р 54350–2015 «Приборы осветительные. Светотехнические требования и методы испытаний».

3. СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение».

4. Железникова О.Е., Амелькина С.А., Сеницына Л.В., Кирюхина С.В. Разработка комплексной методики оценки влияния условий светодиодного освещения на состояние органа зрения и организма человека в целом // Естественные и технические науки. – 2013. – № 5 (67). – С. 249–257.

5. Аксенова С.В., Куликова М.П., Железникова О.Е., Сеницына Л.В., Амелькина С.А. Способ определения зрительного утомления / Патент России № 2534910. 2014. Бюл. № 34.

6. Кучма В.Р., Текшева Л.М., Сухарева Л.М. и др. Гигиенические основы использования светодиодов в системах искусственного освещения. – М.: ФГБУ «Научный центр здоровья детей» РАМН, – 2013. – 246 с.

7. Практикум по физиологии труда / Под ред. К.С. Точилова. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та. – 1970. – 251 с.



Амелькина Светлана Анатольевна, кандидат техн. наук, доцент. Окончила в 1989 г. светотехнический факультет МГУ им. Н.П. Огарёва. Доцент кафедры светотехники МГУ им. Н.П. Огарёва



Железникова Ольга Евгеньевна, кандидат техн. наук, доцент. Окончила в 1989 г. светотехнический факультет МГУ им. Н.П. Огарёва. Заведующий кафедрой светотехники МГУ

им. Н.П. Огарёва. Заслуженный работник высшей школы Республики Мордовия. Член редколлегии журналов «Светотехника» и «Light & Engineering»



Сеницына Людмила Васильевна, кандидат техн. наук, доцент. Окончила в 1989 г. светотехнический факультет МГУ им. Н.П. Огарёва. Доцент кафедры источников света

МГУ им. Н.П. Огарёва