

О координатах цветности основных цветов колориметрической системы КЗС

Г. В. БООС, А. А. ГРИГОРЬЕВ*

НИУ «МЭИ», Москва
E-mail: aag.2010@yandex.ru

Аннотация

В статье определены координаты цветности основного цвета **К** колориметрической системы **КЗС** в колориметрической системе **XYZ**, а также доказываемое несовпадение удельных координат цвета колориметрических систем **КЗС** дихроматов и людей с нормальным цветовым зрением. Показано, что отличие положений максимумов кривых удельных координат цвета **К** в этих системах может достигать 15 нм.

Ключевые слова: колориметрическая система, удельные координаты цвета, координаты цветности, основные цвета, колориметрическая система **КЗС**, дихромат, протаноп, дейтераноп.

1. Введение

В настоящее время светотехники для цветовых расчётов в основном используется рекомендованная МКО колориметрическая система **XYZ**. Ка-

чество цветопередачи при искусственном освещении по методике МКО оценивается общим индексом цветопередачи R_a [1,2]. Расчёты общего индекса цветопередачи проводятся [3] в равноконтрастной системе МКО 1964 $U^*V^*W^*$, однако в этой системе не учитывается цветовая адаптация зрительной системы к излучениям разного спектрального состава. Поскольку спектр излучения стандартного источника, который используется для расчёта R_a , как правило, не совпадает со спектром оцениваемого источника, это привело бы к возникновению систематической погрешности при расчёте R_a . Для устранения этой погрешности при расчёте R_a используются коэффициенты фон Криса [1,2], расчёт которых проводится в колориметрической системе **КЗС**. Поскольку коэффициенты фон Криса (таблица Б7 [3]) однозначно определяются координатами цвета излучения в колориметрической системе **КЗС**, то неточности в определении удельных координат цвета этой системы неизбежно приведут к погрешности расчёта R_a .

Поскольку цветовое пространство введено Д. Максвеллом [4] как ли-

нейное пространство, то удельные координаты цвета любой колориметрической системы достаточно просто рассчитать, если определены координаты цветности основных цветов этой системы в колориметрической системе **XYZ**.

Традиционный способ определения этих координат для колориметрической системы **КЗС** основан на использовании результатов уравнивания цветностей излучений дихроматами. Известно [2,5], что пучок прямых на диаграмме цветности, которые образуют координаты цветностей излучений, неразличимых дихроматами, пересекается в точке с координатами цветности того основного цвета, к которому у дихромата отсутствует чувствительность. Этот подход, предложенный ещё в 19 веке Д. Максвеллом, А. Кёнигом и К. Дитеричи, даёт правильные результаты только при одном условии: кривые спектральной чувствительности оставшихся у дихромата приёмников должны совпадать с кривыми спектральной чувствительности приёмников человека с нормальным цветовым зрением. Данное утверждение всегда вызывало большие сомнения и не доказано до настоящего времени. Причины сомнений в выполнении этого условия, высказанные разными авторами, можно сформулировать следующим образом:

1) Поскольку у дихромата имеются серьёзные отклонения в спектральной чувствительности рецепторов одного типа, то нет оснований говорить о том, что оставшиеся рецепторы имеют нормальную чувствительность.

2) Если дихроматизм вызван не отсутствием одного из приёмников, а существенным снижением его чувствительности, при которой его реакция захватывается ближайшим доминирующим приёмником, то максимум чувствительности доминирующего приёмника должен смещаться в сторону приёмника с пониженной чувствительностью.

3) От себя добавим, что поскольку причина дихроматизма являются нарушения на генном уровне, т.к. он передаётся по наследству, то в ходе эволюции должны были выживать те особи, у которых оставшийся приёмник частично компенсирует отсутствующий.

Основной вывод, который можно сделать из этих рассуждений — координаты цветности основных цветов

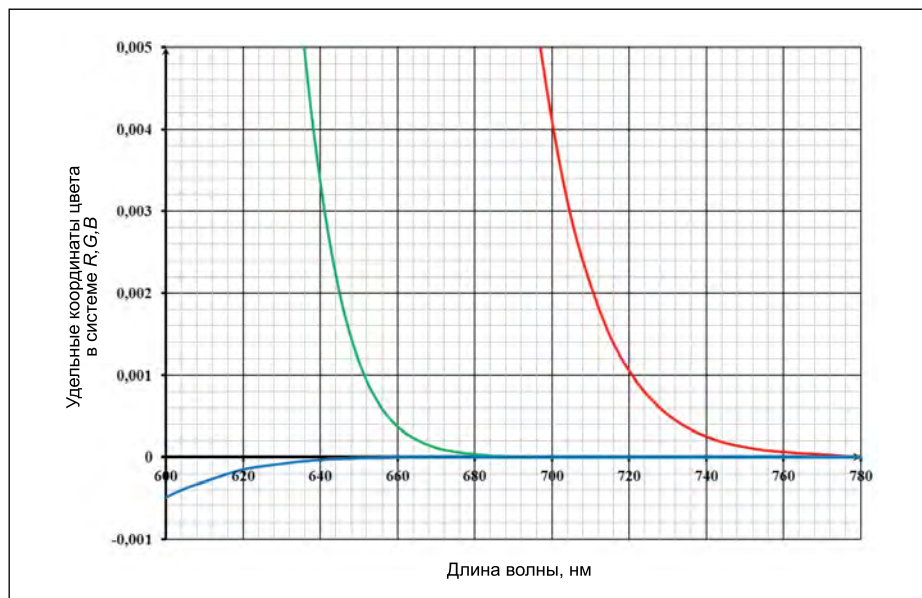


Рис. 1 Удельные координаты цвета цветовой системы **RGB** в красной области спектра.

колориметрических систем *K3C* человека с нормальным цветовым зрением и дихроматов могут не совпадать. Это будет приводить к погрешностям расчётов в колориметрической системе *K3C* человека с нормальным цветовым зрением, если вместо неё использовать колориметрическую систему *K3C* дихроматов.

Задачей проводимого в статье исследования является доказательство несовпадения таких колориметрических систем и выяснения причин их отличия.

В качестве методов исследования будем использовать два известных метода: 1) метод сопоставления экспериментальных результатов, полученных для человека с нормальным цветовым зрением и дихроматов и 2) метод математического моделирования для объяснения причин отличия, получаемых экспериментальных результатов.

2. Результаты исследования

Рассмотрим положение координат цветности основного цвета **K** колориметрической системы *K3C*, полученное на основе экспериментов с протанопами и экспериментов, проведённых на людях с нормальным цветовым зрением.

Экспериментальные данные Ф. Пита для пяти протанопов, обработанные Д. Джадом [5], и эксперименты Е.Н. Юстовой [6] с четырьмя протанопами дают практически совпадающие результаты (0.747; 0.253; 0.0) у Д. Джада и (0.747; 0.250; 0.003) у Е.Н. Юстовой.

Рассмотрим, какие результаты дают эксперименты для наблюдателя с нормальным цветовым зрением. Цветовые характеристики среднего глаза, рекомендованные МКО, получены усреднением результатов И. Гилда и В. Райта и образуют колориметрическую систему *RGB*. На рис. 1 приведены удельные координаты цвета колориметрической системы *RGB* в красной области спектра. Анализ этих экспериментальных результатов показывает, что при длинах волн монохроматических излучений, больших или равных 700 нм, для установления цветового равенства используется только основной цвет **R** ($\lambda = 700$ нм), поэтому координаты цветности этих излучений в колориметрической системе *RGB* совпадают с координатами

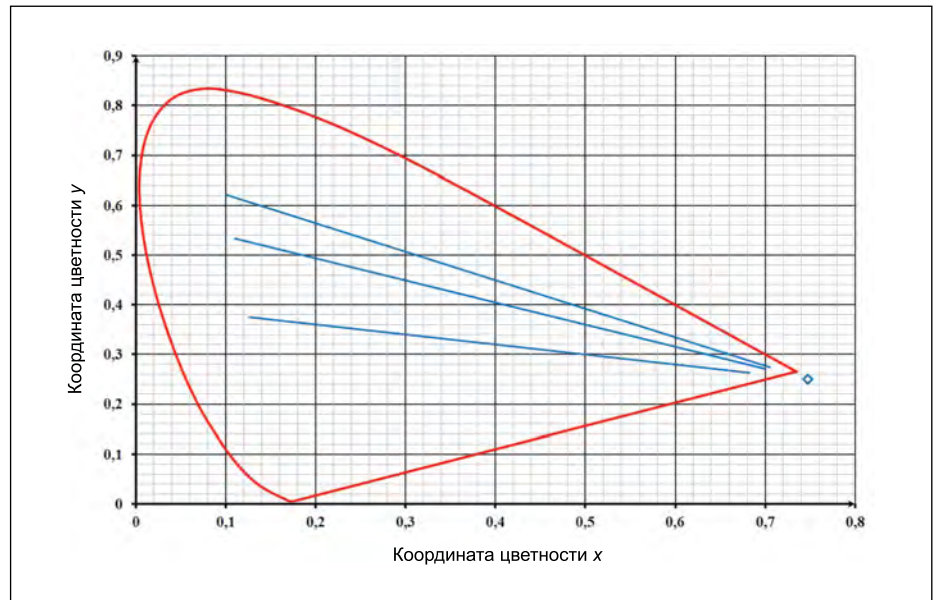


Рис. 2. Координаты цветности основного цвета **K** для протанопов по данным Е.Н. Юстовой

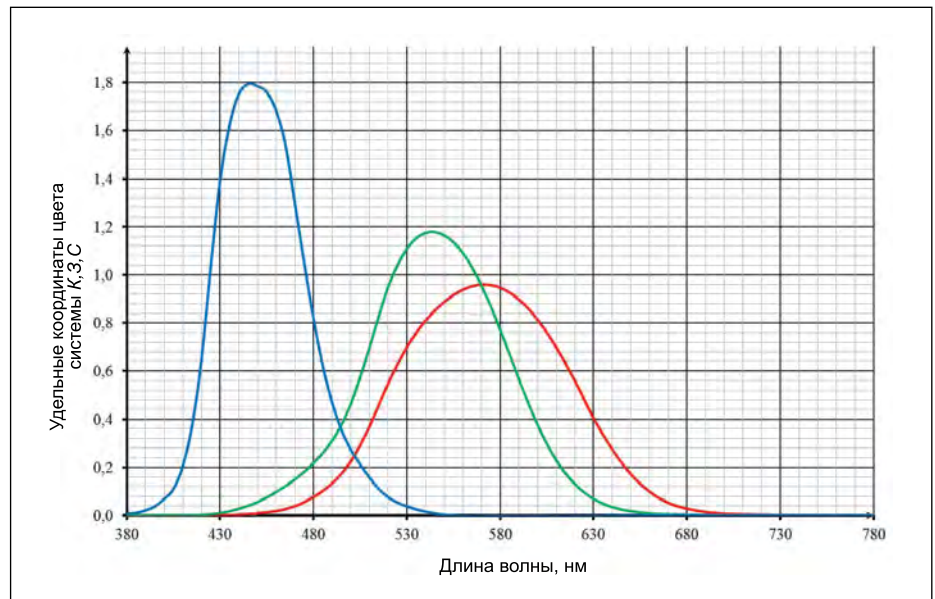


Рис. 3. Удельные координаты цвета системы *K3C*, полученные по экспериментальным результатам Е.Н. Юстовой.

цветности основного цвета **R** – (1,0,0). Для колориметрической системы *K3C* это означает, что излучение с длиной волн 700 нм и больше возбуждает только один тип колбочек – **K**, т.к. для установления цветового равенства не нужно возбуждение ни зелёных **G** рецепторов излучением **G** ($\lambda = 546.1$ нм), ни синих **C**-рецепторов излучением **B** ($\lambda = 435.8$ нм). Из этого следует, что излучения с длинами волн 700 нм и больше имеют в системе *K3C* координаты цветности (1,0,0). Поскольку координаты цветности этих излучений в системе *XYZ* известны (это координаты цветности основного цвета **R** колориметрической си-

стемы *RGB*), то можно утверждать, что координаты цветности основного цвета **K** в системе *XYZ* равны (0.7347; 0.2653; 0.0).

Это не новость в колориметрии, поскольку эти значения координат цветности основного цвета **K**, правда без достаточного обоснования, использовались и в [7].

Как видно из сопоставления координат цветности основного цвета **K**, определённых с использованием протанопов и людей с нормальным цветовым зрением, практически совпадают только координаты *z*. Отличия в координатах x_K и y_K , $\Delta x_K = 0.0123$ и $\Delta y_K = -0.0123$ (2 % и –5 %).

Рис. 4. Координаты цветности основного цвета **K** для протанопов со смещённой на 7.2 нм в синюю область спектра функцией $z(\lambda)$.

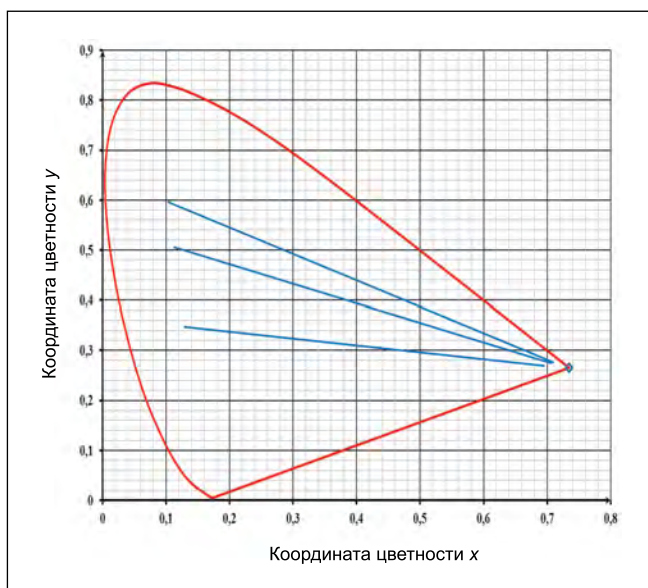
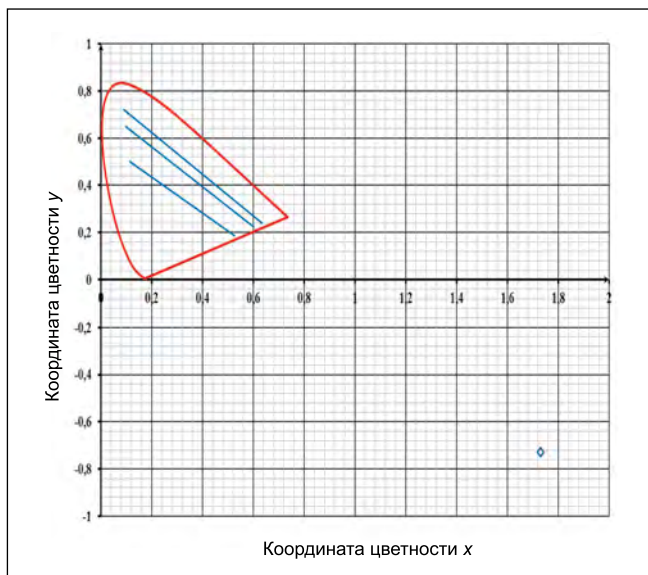


Рис. 5. Координаты цветности основного цвета **З** для дейтеранопов по данным Е. Н. Юстовой



Для установления причин отличия результатов И. Гилда и В. Райта от результатов Е. Н. Юстовой и Д. Джадда нами было проведено математическое моделирование экспериментов с дихроматами, для чего была разработана программа, позволяющая по заданным удельным координатам цвета рассчитывать координаты цветности основных цветов любой колориметрической системы в колориметрической системе XYZ.

При этом программа позволяет смещать кривые удельных координат цвета вдоль спектра без изменения их формы. Методика получения координат цветности основного цвета **K**, реализованная в программе аналогична экспериментальной методике, использованной Д. Джаддом и Е. Н. Юстовой, т.е. чувствительность красного рецептора в програм-

ме полагалась равной нулю и находились точки пересечения прямых, которые образуют координаты цветностей излучений, неразличимых такими «протанопами».

На рис. 2 приведены результаты расчётов, когда в качестве $\bar{k}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$, $\bar{c}(\lambda)$ взяты удельные координаты цвета системы КЗС, представленные на рис. 3. Эти функции получаются, если использовать координаты цветности основных цветов колориметрической системы КЗС, найденные Е. Н. Юстовой. Как и следовало ожидать мы получили координаты (0.747; 0.250; 0.003), т.е. координаты цветности основного цвета **K** найденные Е. Н. Юстовой.

Если положение кривой $z(\lambda)$ сместить на 7.2 нм в синюю область спектра, то получатся результаты, представленные на рис. 4. В этом случае

координаты цветности основного цвета **K** протанопов практически совпадают с координатами цветности основного цвета **K**, для наблюдателя с нормальным цветовым зрением. Это доказывает, что кривая спектральной чувствительности $z(\lambda)$ протанопов смещена в красную область спектра более чем на 7 нм по сравнению с $z(\lambda)$ человека с нормальным цветовым зрением.

Прямые, характеризующие цветности излучений, неразличимые протанопами, имеют достаточно большой угол схождения, поэтому координата цветности основного цвета **K** для протанопов определяется достаточно точно.

Значительно хуже дело обстоит при определении координат цветности основного цвета **З** по экспериментам с дейтеранопами. На рис. 5 представлены результаты расчёта по упомянутой выше программе координат цветности основного цвета **З** при использовании $\bar{k}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$, $\bar{c}(\lambda)$, полученных Е. Н. Юстовой (рис. 3). При этом, в программе для расчёта, чувствительность зелёного рецептора $\bar{z}(\lambda)$ полагалась равной нулю.

Как и следовало ожидать, мы получили координаты цветности основного цвета **З**, определённые Е. Н. Юстовой, а именно (1.73; -0.73; 0.00).

В отличие от графиков, полученных для протанопов, прямые на графиках рис. 5 почти параллельны между собой. Это вносит большую погрешность в определение координат точки пересечения прямых, а следовательно, и в координаты цветности основного цвета **З**. Именно эта причина приводит к значительным расхождениям в координатах цветности основного цвета **З**, полученных Д. Джаддом и Е. Н. Юстовой. Данное обстоятельство заставило Н.Д. Ньюберга разработать уточняющую методику [8], которая использовала не только направление экспериментальных прямых в цветовом пространстве XYZ, полученных для дейтеранопов, но и соотношение яркости основных цветов колориметра, на котором дейтеранопы уравнивали цветности излучений. Это увеличивает точность определения координат цветности основного цвета **З**, и поэтому данные, полученные Е. Н. Юстовой можно считать вполне достоверными. Однако они относятся к координатам цветности основных цветов именно ди-

хроматов, а не людей с нормальным цветовым зрением.

Применять эти координаты к людям с нормальным цветовым зрением нельзя потому, что при y_3 меньше нуля яркостный коэффициент для основного цвета Z будет меньше нуля. Это противоречит принципу, сформулированному Н.Д. Ньюбергом в [9], который позволил ему определить область возможных значений координат цветности основного цвета S . Мы, следуя Н.Д. Ньюбергу, также считаем, что яркостные коэффициенты всех основных цветов у наблюдателя с нормальным цветовым зрением должны быть положительны. Рассмотрим, когда это условие может выполняться.

Как было доказано выше, у протанопов функция $z(\lambda)$ смещена, по сравнению с наблюдателем, имеющим нормальное зрение, в направлении максимума чувствительности отсутствующего у него приёмника $k(\lambda)$, так что, можно предположить, что такое же смещение максимума $k(\lambda)$ будет у дейтеранопов в направлении отсутствующего приёмника $z(\lambda)$, т.е. в синюю область спектра. Данному предположению есть одно экспериментальное подтверждение. Единственные известные нам эксперименты, по результатам которых были определены кривые $k(\lambda)$ и $z(\lambda)$ для людей с нормальным цветовым зрением, приведены в работе Н.Т. Фёдорова и В.И. Фёдоровой [10]. Эти весьма небезвредные для глаз эксперименты с искусственной цветовой слепотой показали, что максимум чувствительности красных рецепторов находится в районе 600 нм, в то время как по Е.Н. Юстовой (рис. 3) этот максимум находится на длине волны 570 нм, т.е. отличие составляет 30 нм. Мощное облучение зелёным цветом с $\lambda = 510$ нм, использованное Фёдоровыми, влияет в большей степени на $z(\lambda)$, но оно воздействует и на $k(\lambda)$, поэтому в количественной мере доверять этим результатам нельзя, но можно отметить, что максимум $k(\lambda)$ дейтеранопов смещён в коротковолновую область спектра по сравнению с наблюдателями, обладающими нормальным цветовым зрением. Смоделируем, к чему приведёт смещение максимума $k(\lambda)$ дейтеранопов в область больших длин волн, т.е. в направлении предполагаемого максимума $k(\lambda)$ человека с нормальным цветовым зрением.



Рис. 6. Прямые неразличимых дейтеранопами цветностей при смещении $k(\lambda)$ на 6,4 нм в красную область спектра

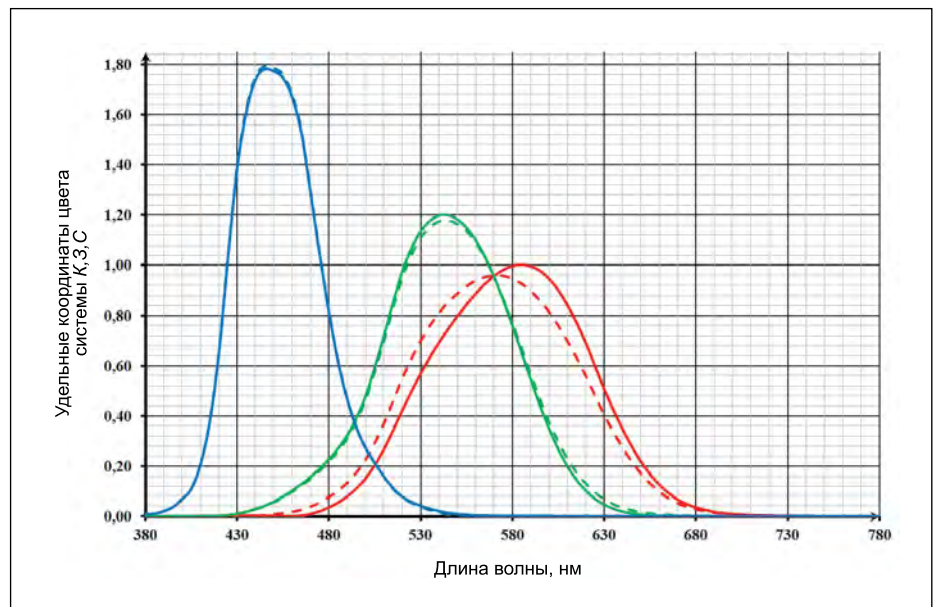


Рис. 7. Удельные координаты цвета колориметрических систем КЗС при $y_3 > 0$ и $y_3 < 0$.

На рис. 6 представлен расчётный график при смещении кривой $k(\lambda)$, изображённой на рис. 3, на 6,4 нм в красную область спектра.

Координаты цветности цвета Z на графике рис. 6 не показаны, т.к. прямые на графике параллельны и эти координаты равны $(\infty; -\infty; 0)$. При дальнейшем смещении $k(\lambda)$ в красную область спектра прямые на графике пересекаются при положительном значении координаты y и отрицательной координате x . Это снимает противоречие, возникающее при использовании результатов исследования дейтеранопов, которые дают отрицательное значение яркостного коэффициента для основного цвета Z .

Расчёты показывают, что зависимости для $y_3 < 0$ и $y_3 > 0$ отличаются достаточно сильно. На рис. 7 приве-

дены удельные координаты цвета для $y_3 < 0$; (пунктирные кривые) и $y_3 > 0$ (сплошные кривые). Отличие в положении максимумов $k(\lambda)$ для этих кривых достигает 15 нм.

3. Выводы

1) Координаты цветности двух из трёх основных цветов колориметрической системы КЗС человека с нормальным цветовым зрением (K и Z) в колориметрической системе XYZ существенно отличаются от соответствующих координат цветности основных цветов колориметрической системы КЗС дихроматов.

2) В отличие от распространённого мнения, что все основные цвета колориметрической системы КЗС относятся к пространству нереаль-

ных цветов, координаты цветности основного цвета K расположены на диаграмме цветности и имеют координаты цветности излучений с длинами волн $\lambda \geq 700$ нм, т.е. (0.7347; 0.2653; 0.0). Таким образом основной цвет K в колориметрической системе КЗС является реальным цветом.

3) Использование колориметрической системы КЗС дихроматов вместо колориметрической системы КЗС человека с нормальным цветовым зрением приводит к погрешностям при расчётах. Оценить возникающую при этом погрешность пока невозможно, поскольку неизвестны истинные значения ординат сложения цветов для человека с нормальным цветовым зрением.

Колориметрическая система КЗС используется не только в ГОСТе [3]. Например, в [11] предпринята попытка разработки дистанционного колориметра на базе колориметрической системы КЗС, однако в качестве удельных координат цвета в нём используются функции, полученные с использованием колориметрической системы дихроматов, приведённые в [5]. Это показывает, что разработка метода нахождения удельных координат цвета колориметрической системы КЗС человека с нормальным цветовым зрением, первые попытки реализации которого отражены в [12,13], является актуальной задачей, которую необходимо решать и теоретически, и экспериментально.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю.Б. Айзенберга. 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Знак, 2006. 972 с.
2. Мешков В.В., Матвеев А.Б. Основы светотехники: Учебное пособие для вузов: В2-ч ч. Ч. 2. Физиологическая оптика и колориметрия. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат., —1989. —450 с.
3. ГОСТ 23198–94 Лампы электрические. Методы измерения спектральных и цветовых характеристик.
4. Maxwell J. Clerk On the Theory of Compound Colours, and the Relations of the Colours of the Spectrum. // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. — 1860. — P. 57–84.
5. Джадд Д., Вышецки Г. Цвет в науке и технике. — М.: Мир. —1978. —592 с.
6. Юстова Е.Н. Определение координатных осей основной физиологической системы из опытов с цветослепыми. // До-

клады АН СССР. —1948. — Т. 63. —№ 4. — С. 383–385.

7. Кустарев А.К. Об основных цветах физиологической цветовой системы. // Светотехника. —1965. —№ 6. С. 5–11.

8. Нюберг Н.Д. Новый способ определения положения основных физиологических цветов из опытов с цветнослепыми. // Доклады АН СССР. 1948. — Т. 63. —№ 4. — С. 379–381

9. Нюберг Н.Д. Определение положения в цветовом треугольнике основного синего цвета. // Доклады Академии Наук СССР. —1949. — Т. 65. —№ 2. — С. 159–62.

10. Фёдоров Н.Т., Фёдорова В.И. Исследования по цветному зрению. // Известия академии наук СССР, Отделение математических и естественных наук. —1935. — С. 1431–1449.

11. Заргарьянц Г.С., Михайлов О.М. Интегральный дистанционный колориметр на основе колориметрической системы КЗФ // Светотехника. — 2008. — № 3, — С. 19–25.

12. Гордюхина С.В., Григорьев А.А. Метод определения чувствительности КЗС рецепторов на основе статистической модели органа зрения // Вестник МЭИ. — М: Издательский дом МЭИ. — 2010. — № 2. — С. 174–178.

13. Григорьев А.А., Гордюхина С.В. Определение удельных координат цвета физиологической системы // Полупроводниковая светотехника. — С-П: Премиум Пресс. — 2011. — № 1. — С. 44–47.



Боос Георгий Валентинович, кандидат техн. наук. Окончил в 1986 г. МЭИ. Президент холдинга VL Group. Заведующий кафедрой «Светотехника» ФГБОУ ВПО

«Национальный исследовательский университет «МЭИ». Лауреат Государственной премии РФ за архитектурное освещение Москвы. Председатель редколлегии журнала «Светотехника»



Григорьев Андрей Андреевич, доктор техн. наук, профессор. Окончил в 1972 г. МЭИ. Зам. заведующего кафедрой «Светотехника» ФГБОУ ВПО

«Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Поздравляем с юбилеем!



Редакция и редколлегия поздравляют общественного корреспондента и большого друга журнала

Рувима Израилевича Плашковского

с 85-летием и желает ему здоровья, счастья и многих лет плодотворного сотрудничества с журналом