

ховатость снижается по сравнению с обычным шлифованием.

Анализ результатов эксперимента показывает, что с повышением скорости шлифования и магнитной индукции шероховатость увеличивается, но с определенного значения. На рис. 3 явно видна экстремальная точка шероховатости $Ra = 0,3$ мкм для магнитной индукции 0,15 Тл. Взаимодействие технологического тока и магнитного поля происходит следующим образом: с увеличением силы тока до 21 А зависимость шероховатости от магнитной индукции и скорости шлифования изменяется. Оказывая влияние на разряд в зоне шлифования, магнитное поле в этом диапазоне увеличивает проплавляющую способность тока и локализует его в узкой области. В результате все микронеровности оплавляются и расплав под действием внешнего магнитного поля растекается по поверхности детали, уменьшая шероховатость.

ВЫВОДЫ

1. Исследованы технологические режимы МЭШ (сила тока, магнитная индукция, окружная скорость, толщина снимаемого слоя, величина подачи) и их взаимодействие в процессе шлифования.

2. МЭШ повышает производительность обработки по сравнению с обработкой традиционным шлифованием абразивными кругами.

3. На основе экспериментальных данных получены уравнения регрессии, устанавливающие зависимость производительности и шеро-

ховатости поверхности от основных параметров МЭШ.

4. Установлено влияние электрофизических параметров на производительность процесса МЭШ при следующих режимах обработки: $I = 20-38$ А; $B = 0,2-0,35$ Тл; $v = 12,5$ м·с⁻¹; $H = 0,05-0,3$ мм; $S = 13,3-15,5$ мм·с⁻¹. Установлено влияние электрофизических параметров на шероховатость поверхности при МЭШ при следующих режимах: $I = 10-15$ А; $B = 0,2-0,3$ Тл; $v = 12,5$ м·с⁻¹; $H = 0,05-0,2$ мм; $S = 13,3-15,5$ мм·с⁻¹.

5. Технология МЭШ является одним из перспективных способов шлифования износостойких газотермических покрытий и упрочненных поверхностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кудинов, В. В.** Нанесение покрытий напылением: теория, технология и оборудование: учеб. для вузов / В. В. Кудинов, Г. В. Бобров. – М.: Metallurgy, 1992. – 432 с.
2. **Кожуро, Л. М.** Обработка деталей машин в магнитном поле / Л. М. Кожуро, Б. П. Чемисов; под ред. Н. Н. Подлекарева. – Минск: Наука і тэхніка, 1995. – 232 с.
3. **Абразивная** и алмазная обработка материалов: справ.; под ред. А. Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
4. **Алмазно-абразивная** обработка и упрочнение изделий в магнитном поле / П. И. Ящерицын [и др.]. – Минск: Наука и техника, 1988. – 272 с.
5. **Дмитриченко, Э. И.** Влияние напряженности магнитного поля в зоне обработки на механизм разрушения стружки при МЭШ / Э. И. Дмитриченко // Тез. докл. 6-й НТК ГПИ. – Гомель, 1992. – 28 с.

Поступила 6.06.2006

УДК 621.793.184

КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫХ ЗАЩИТНО-ДЕКОРАТИВНЫХ ПОКРЫТИЙ

Канд. физ.-мат. наук АГЕЕВ В. А., докт. техн. наук ВЕРШИНА А. К.

Белорусский государственный технологический университет

Воспроизведение цвета с регламентированными характеристиками является одной из основных задач при формировании защитных покрытий декоративного назначения. Ее решение включает этап проектирования структурно-компонентной композиции с оптическими ха-

рактеристиками, позволяющими воспроизвести желаемый цвет, который может быть задан как координатами цвета или цветности в одной из колориметрических систем, так и спектральным коэффициентом отражения. На этом этапе, в первую очередь, необходимо убедиться в том,

что требуемое цветовое ощущение реализуемо при выбранных источниках освещения. В случае положительного ответа следует также определить величину и приемлемость искажения цвета, неизбежно возникающего при смене освещения (изменение эксплуатационных условий, деградация оптических свойств источника освещения и др.).

Необходимость мониторинга реализации регламентируемого цвета синтезируемых плазменно-вакуумных защитно-декоративных покрытий (ЗДП) объясняется тем, что само по себе покрытие как несамосветящийся объект в отсутствие освещения цвета не имеет. Возникающее цветовое ощущение является результатом реакции мозга на амплитудное модулирование электромагнитного излучения видимого спектрального диапазона, исходящего из самосветящегося объекта, при взаимодействии с покрытием. В этой связи воспринимаемый цвет ЗДП с неселективным спектром отражения соответствует либо цвету источника освещения, либо цвету остаточного изображения, который дополняет цвет источника, либо серому цвету. Известно, что предмет, отражающий свет любой цветности, при помещении в соответствующие условия освещения воспринимается серым [1, 2]. Цветовое восприятие, обусловленное так называемым цветовым стимулом (лучистой энергией с определенными физическими характеристиками, достигающей глаза наблюдателя), описывается тремя психологическими параметрами: цветовым тоном (зрительное ощущение хроматического цвета в диапазоне красный-фиолетовый), насыщенностью (количество чистого хроматического цвета в общем цветовом ощущении, т. е. независимо от количества ахроматического цвета) и светлотой (интегральное количество отраженного света, формирующее ощущение в диапазоне черный-белый) [1–6]. То, каким точно будет восприниматься цвет синтезируемого плазменно-вакуумными методами ЗДП, зависит от соотношения яркостей в цветовом стимуле и адаптации зрительного механизма к условиям воздействия лучистой энергии освещающего излучения. Реальное восприятие цвета покрытия усложняется также существенным вкладом в результирующее ощущение различных зрительных явлений [3], в частности таких, как одновременный и последовательный контрасты, постоянство цвета и цветовая память, присут-

ствие в поле зрения других предметов. При определении реального восприятия цвета покрытия изменение адаптации глаза может быть исключено выбором тестовых излучений с одинаковой коррелированной цветовой температурой [1], либо расчет выполнен с использованием коэффициентов фон Криса или Брэдфорда [4], а для описания одновременного и последовательных контрастов возможно использование соответствующих формул, полученных на основе теории оппонентных цветов [5]. Кроме того, для большинства применений плазменно-вакуумных ЗДП, по-видимому, можно ограничиться такими условиями, при которых исключаются указанные зрительные явления, и считать, что формируемое цветовое ощущение полностью (или почти полностью) определяется только качеством освещающего тестового излучения (лампы накаливания, различные фазы естественного дневного света, флюоресцентные лампы различных типов, галогеновые и ксеноновые лампы низкого и высокого давлений и др. [1, 6]). Качество излучения согласно рекомендациям Международной комиссии по освещению (МКО – CIE /Commission Internationale de l'Éclairage/) характеризуется так называемым коэффициентом цветопередачи. Он определяется как средний колориметрический сдвиг координат цветности на равноконтрастном цветовом графике для ряда тестовых образцов по отношению к исследуемому и стандартному источникам излучения [1, 7]. Коэффициент цветопередачи может быть охарактеризован также как сумма площадей зон воспроизводимых цветов, максимально возможных при освещении идеального отражателя тестируемыми излучениями [8]. Однако знание коэффициента цветопередачи источника света не отвечает на вопрос о возможности реализации регламентируемого цветового тона, насыщенности и светлоты проектируемого ЗДП при использовании того или иного излучения в качестве освещения.

В этой связи в программный комплекс, предназначенный для проектирования структурно-компонентной композиции плазменно-вакуумных ЗДП с оптическими характеристиками, обеспечивающими получение регламентируемого цветового восприятия, включен модуль для мониторинга соответствия задаваемых цветовых параметров цветоформирующим возможностям используемого освещения. Алго-

ритм выполнения программы и используемый математический аппарат приведены на рис. 1.

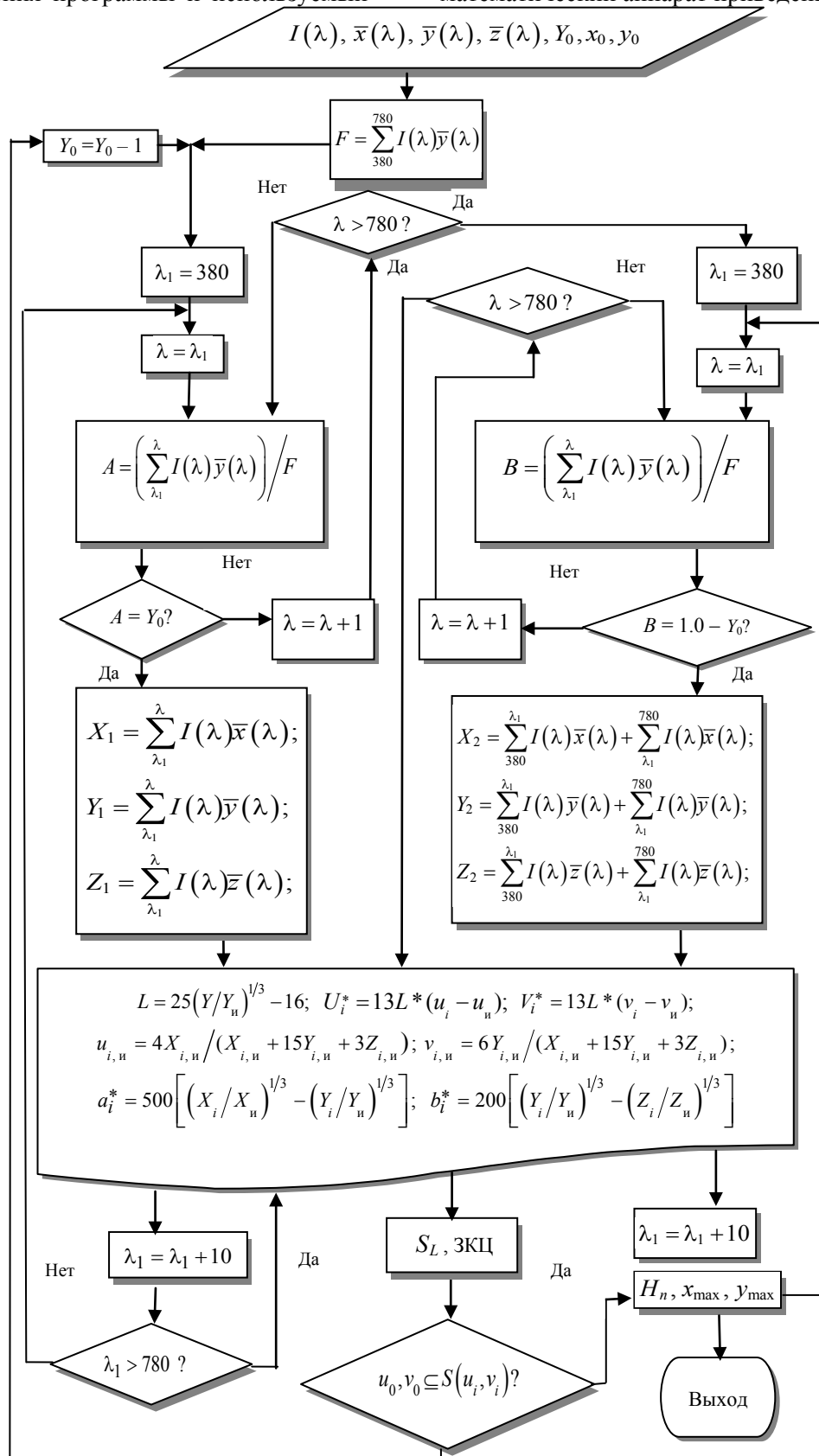


Рис. 1. Блок-схема программы мониторинга реализации регламентируемых цветовых характеристик, синтезируемых

ЗДП при варьировании спектрально-энергетических характеристик освещения

Методика расчета основана на определении диапазона цветов, количество которых ограничено линией оптимальных цветовых стимулов (так называемой границей (пределом) Мак-Адама [9]), реализуемых при освещении оптимальных фильтров Шрёдингера [10]. Спектральные коэффициенты отражения таких фильтров имеют нулевые значения на отдельных участках спектра и равны единице на остальных при наличии не более двух переходов от нуля к единице, обеспечивая при этом значение яркости, равное светлоте желаемого цвета проектируемого ЗДП. Возможны только четыре типа таких фильтров: 1 – с началом максимума отражения при $\lambda_1 = 380$ нм и переходом к нулю при $\lambda_2 < 780$ нм; 2 – при $\lambda_1 > 380$ нм и $\lambda_2 < 780$ нм; 3 – при $\lambda_1 > 380$ нм и $\lambda_2 = 780$ нм; 4 – при $\lambda_2 < \lambda_1 < 780$ нм и 780 нм $< \lambda_1 < \lambda_2$ (рис. 2).

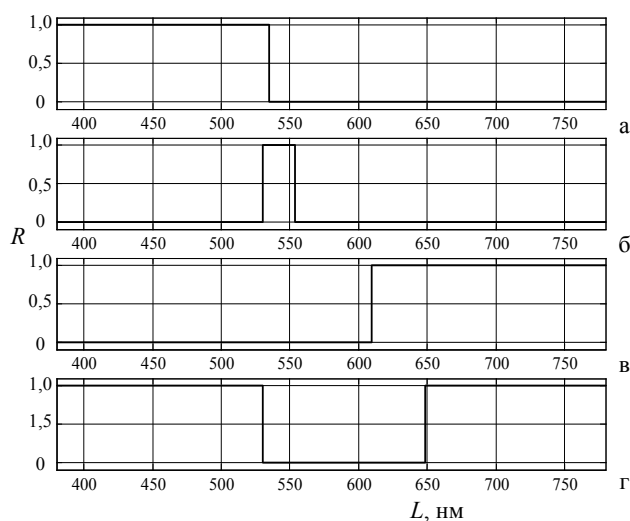


Рис. 2. Вид спектральных коэффициентов отражения оптимальных фильтров Шрёдингера: а – $\lambda_1 = 380$ нм, $\lambda_2 = 534,8$ нм; б – 530, 553,9; в – 609,8, 780; г – $\lambda_1 = 648,8$ нм, $\lambda_2 = 530,0$ нм (площадь, ограниченная меандром, во всех случаях обеспечивает коэффициент яркости $L^* = 50,00/Y = 18,42/$ для стандартного излучения A/1931 (лампа накаливания /планковский излучатель/, коррелированная цветовая температура 2856 К, стандартный наблюдатель МКО (1931) с углом зрения 2°)

Принятые обозначения: $I(\lambda)$ – относительное спектральное распределение используемых излучений (применимы все источники излучения, стандартизованные МКО, а также источники излучения с известной коррелированной цветовой температурой или координатами цветности, либо с известным спектрально-энергетическим распределением, в том числе

и люминесцентные лампы); $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ – координаты цвета спектральных излучений в системе МКО 1931 (1960); $X, Y, Z, L^*, a^*, b^*, u^*, v^*$ – координаты цвета и x, y, u, v – координаты цветности в соответствующих системах МКО; индекс u относится к источнику излучения, 0 – к проектируемому покрытию, i – к соответствующим значениям координат цветности спектральных излучений; λ_1, λ_2 – начальная и конечная длины волн перехода от нуля к единице и обратно коэффициента отражения оптимального фильтра Шрёдингера; S_L – площадь зоны, расположенной внутри границы оптимальных цветовых стимулов; ЗКЦ – зональный коэффициент цветопередачи в заданном сечении цветового тела предметов; x_{\max}, y_{\max} – координаты цветности максимально возможной насыщенности цвета и H_p – чистота цветового тона покрытия, %.

Последовательность работы программы следующая. В начале задаются источник освещения, наблюдатель МКО (1931, 1964) и колориметрическая система ($xyY/L^*a^*b^*$) и вводятся желаемые цветовые характеристики проектируемого покрытия. После определения на равноконтрастном цветовом графике $u-v$ МКО (1960) участка, расположенного внутри границы Мак-Адама, и его площади (для оценки коэффициента цветопередачи в заданном сечении цветового тела предметов) проверяется попадание в эту область значений координат цветности проектируемого покрытия. Метод нахождения тестируемого цвета внутри области основан на положениях векторной алгебры и тождественен реализованному в [11] при определении доминирующей длины волны. Если ответ положителен, то рассчитываются значение чистоты цвета покрытия, а также координаты цветности и коэффициент яркости максимально возможной насыщенности для цветового тона, соответствующего проектируемому покрытию. Если же ответ отрицателен, то определяется ближайшее значение коэффициента яркости, которое должно обеспечить проектируемое покрытие при заданных координатах цветности. Кроме того, по отдельному запросу рассчитывается цветовой охват, ограниченный монохроматическими стимулами при указанном значении яркости используемого излучения, что позволяет характеризовать самосветящиеся объекты. На заключительном этапе рас-

четные данные табулируются, записываются в файл базы данных и выводятся на печать.

Работа модуля мониторинга иллюстрируется следующими примерами. Допустим, цвет желаемого покрытия должен описываться параметрами: $Y = 60$; $x = 0,6100$; $y = 0,3550$ для наблюдателя МКО (1931) и излучения A (лампа накаливания). Однако расчет показывает, что при регламентированном освещении реально такие параметры не достижимы и для заданных координат цветности максимальное значение, которого может достигать Y , равно 51; при этом чистота цвета (максимальное значение хроматичности) составляет 99,06 % (рис. 3а). Пусть в другом случае заданы те же координаты цветности, но $Y = 40$. Расчет показывает, что при регламентированном освещении этот цвет реализуем, причем чистота цвета составляет 76,22 %. Максимальное значение чистоты цвета (100 %) при данной яркости $Y = 40$ соответствует координатам цветности $x = 0,6114$; $y = 0,3546$ (рис. 3б). Следовательно, варьированием шероховатости покрытия, т. е. величиной интегрального неселективного отражения, можно повысить насыщенность цвета без существенного изменения цветового тона (доминирующей длины волны).

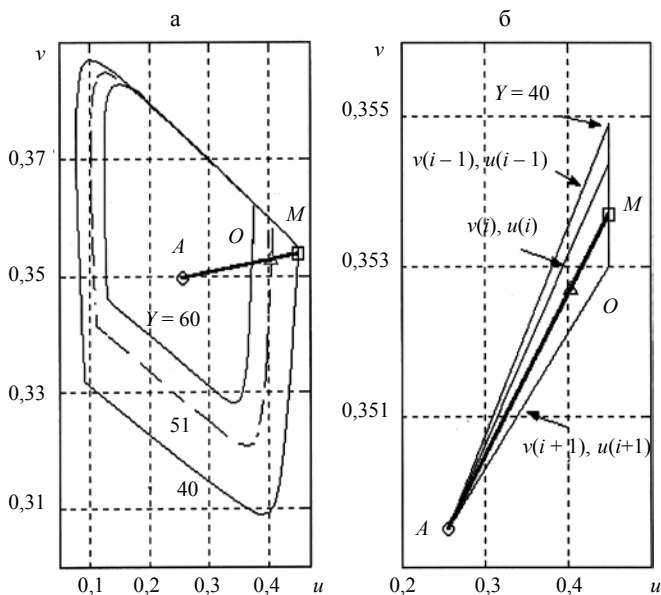


Рис. 3. а – $(u - v)$ -график с границами оптимальных цветовых стимулов при $Y = 40, 51$ и 60 ; б – участок графика, используемый для определения чистоты цвета; A – координаты цветности источника освещения ($x = 0,4476$; $y = 0,4075$); O – координаты цветности задаваемого покрытия ($x = 0,6100$, $y = 0,3550$); M – координаты цветности точки максимальной чистоты цвета при регламентированном $Y = 40$; $A - v(i - 1), u(i - 1) - v(i), u(i)$ и $A - v(i),$

$u(i) - v(i - 1), u(i - 1) - v(i), u(i)$ – треугольники, внутри которых выполняется поиск

На рис. 4 приведены границы областей, образованных оптимальными цветовыми стимулами несамосветящихся объектов (максимальная область реализуемых цветов), при освещении их излучением A (а) и $D65$ (б) для стандартного (1931) и дополнительного (1964) наблюдателей МКО при варьировании коэффициента яркости Y с шагом 10. Очевидно, что использование дневного света позволяет наблюдать значительно большее количество цветов, особенно в коротковолновой (синей) области спектра и при малых значениях Y . Эти графики могут служить прогнозными картами при мониторинге реализации регламентированного цвета синтезируемых ПВДП. Аналогичные карты были рассчитаны для всех рекомендуемых МКО источников освещения и типичных промышленных люминесцентных ламп для наблюдателей (1931, 1964).

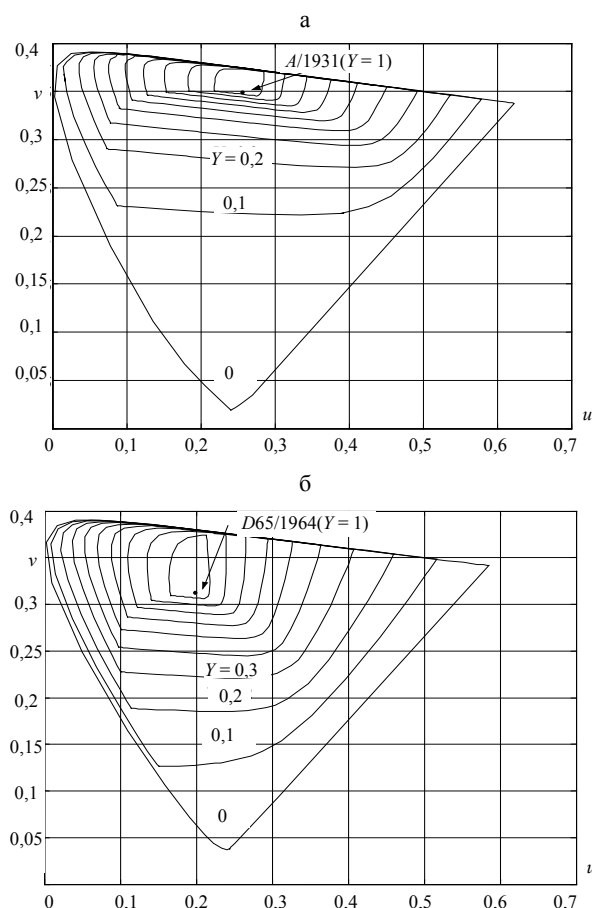
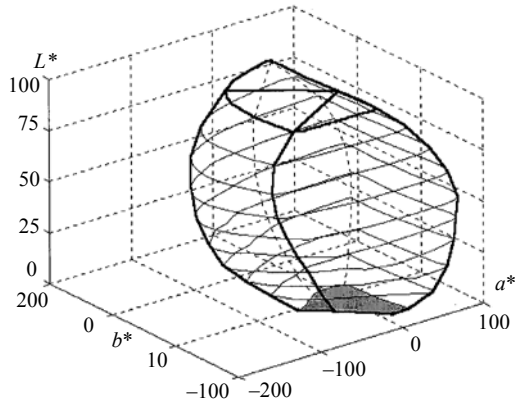


Рис. 4. Границы областей оптимальных цветовых стимулов несамосветящихся предметов при освещении: а – $A/1931$; б – $D65/1964$ (солнечный свет, коррелированная цветовая температура 6504 К, дополнительный стандарт-

ный наблюдатель МКО (1964) с углом зрения 10° при варьировании коэффициента яркости $Y=0-100$ с шагом 10

Цветовое тело несамосветящихся объектов, потенциально возможное при использовании



излучения A , в колориметрической системе $L^*a^*b^*$ показано на рис. 5.

Рис. 5. Цветовое тело несамосветящихся предметов при освещении – наблюдении $A/1931$ в колориметрической системе $L^*a^*b^*$

Для сравнения на рис. 6 и 7 изображены цветное тело (а) и его проекции (б) самосветящихся объектов (излучения A и $D65$) в колориметрических системах $L^*U^*V^*$ и $L^*a^*b^*$ соответственно при варьировании L с шагом 10. Эти графики могут служить прогнозными картами при мониторинге цветовоспроизводящих возможностей излучения.

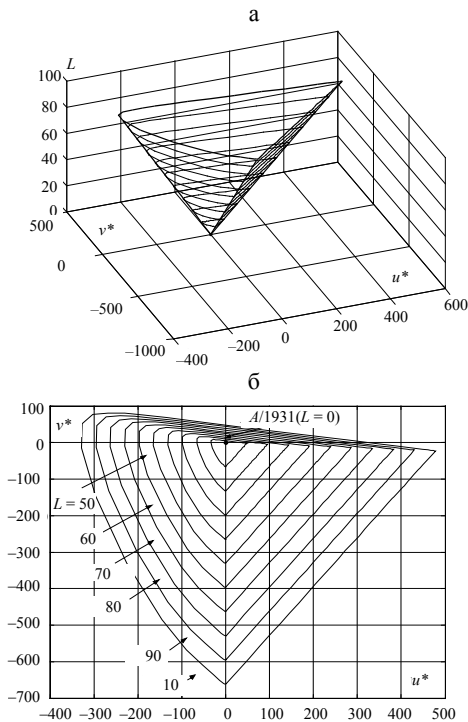


Рис. 6. Цветовое тело: а – самосветящихся объектов в колориметрической системе $L^*u^*v^*$ при освещении/на-

блюдении $A/1931$ и границы областей монохроматических стимулов; б – при варьировании $L = 0-100$ с шагом 10

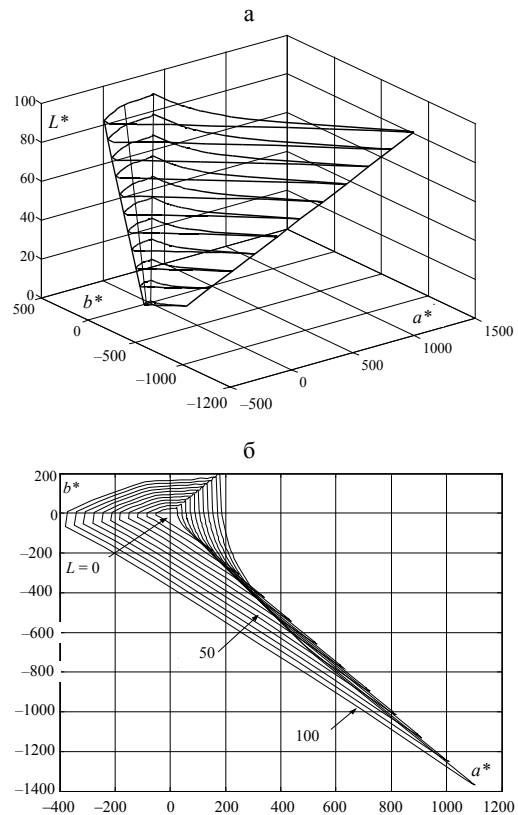


Рис. 7. Цветовое тело самосветящихся объектов: а – в колориметрической системе $L^*a^*b^*$ при освещении/наблюдении $D65/1964$ и границы монохроматических стимулов; б – при варьировании $L = 0-100$ с шагом 10

Однако следует особо подчеркнуть, что область цветов, воспроизводимых несамосветящимися объектами, значительно меньше, чем область цветов, воспроизводимых самосветящимися объектами (рис. 8).

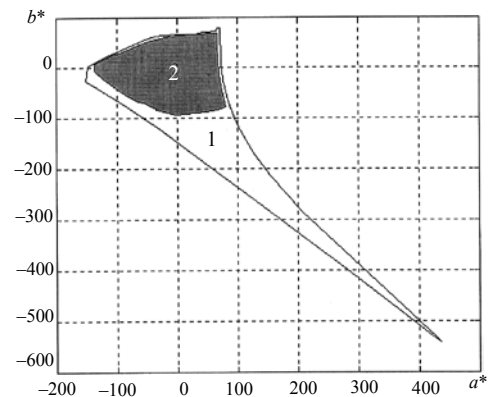


Рис. 8. Области возможных цветов, воспроизводимых: 1 – самосветящимися; 2 – несамосветящимися идеально отражающим объектами в сечении $L = 20$ (колориметрическая система $L^*a^*b^*$, освещение – наблюдение $A/1931$)

В этой связи при мониторинге ЗДП для выбора излучения с регламентируемой цветопередачей целесообразно руководствоваться зональными (яркостными) коэффициентами цветопередачи идеального шрёдингеровского отражателя, определявшийся нами как отношение площадей зон, охватываемых границами оптимальных цветовых стимулов при максимальной и регламентируемой яркостях (рис. 9).

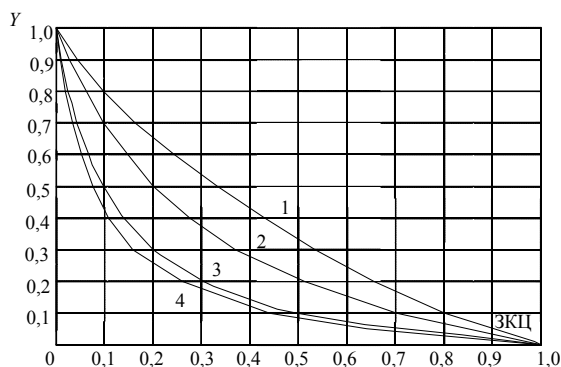


Рис. 9. Зональные (яркостные) коэффициенты цветопередачи при варьировании $Y = 0-100$ с шагом 10 для некоторых источников стандартного излучения: 1 – D65/1964; 2, 4 – F/1931 (люминесцентные лампы); 2 – Daylight, коррелированная цветовая температура 3000 K; 4 – Standard Warm White, коррелированная цветовая температура 3000 K [4]; 3 – A/1931

ВЫВОД

Применение описанного модуля позволяет при известных характеристиках освещения, реализуемого в условиях эксплуатации ЗДП, провести мониторинг реализации регламентируемых цветовых характеристик проектируемых покрытий, определить цветовое тело несамосветящихся (диапазон цветов, воспроизводимых оптимальными цветовыми стимулами) и самосветящихся (диапазон цветов, воспроизводимых монохроматическими стимулами)

объектов, а также зональный (яркостный) коэффициент цветопередачи источников освещения.

ЛИТЕРАТУРА

1. CIE (Commision Internationale de l'Eclairage). Colorimetry. Official Recommendations of the International Commission on Illumination. Publication CIE № 15 (E-1.3.1). – Paris: Bureau Central de la CIE, 1971. – 124 p.
2. Nelson, H. Some factors and applications of color constancy / H. Nelson // J. Opt. Soc. Am. – 1943. – V. 33, № 6. – P. 555–559.
3. Шашлов, Б. А. Цвет и цветовоспроизведение / Б. А. Шашлов. – М.: Книга, 1986. – 280 с.
4. Hunt, R. W. G. Chromatic adaptation transforms / R. W. G. Hunt, C. Li, M. R. Luo // Color Research and Application. – 2005. – V. 30, № 1. – P. 69–71.
5. Härd, A. NCS, Natural Color System – from concept to research and application. Part I / A. Härd, L. Sivic, G. Tonquist // Color Research and Application. – 1996. – V. 21, № 3. – P. 180–205; Part II // P. 206–220.
6. Deng, L. An evaluation of the Hunt94 color appearance model under different light sources at low photopic to low mesopic light levels / L. Deng, L. Chen, M. S. Rea // Color Research and Application. – 2005. – V. 30, № 2. – P. 107–117.
7. Thornton, W. A. Color discrimination index / W. A. Thornton // J. Opt. Soc. Am. – 1972. – V. 62. – P. 191–194.
8. Xu, H. Color-rendering capacity of illumination / H. Xu // J. Opt. Soc. Am. – 1983. – V. 73, № 12. – P. 1709–1713.
9. MacAdam, D. L. Theory of the maximum visual efficiency of colored materials / D. L. MacAdam // J. Opt. Soc. Am. – 1935. – V. 25, № 2. – P. 249–252.
10. Schrödinger, E. Theorie der pigmente von grösster leuchtkraft / E. Schrödinger // Ann. Phys. (Leipzig). – 1920. – V. 62. – P. 603–622.
11. Вершина, А. В. Ионно-плазменные защитно-декоративные покрытия / А. В. Вершина, В. А. Агеев. – Гомель: ИММС, 2001. – 172 с.

Поступила 12.02.2007