

И. Г. Пальчикова¹, Е. С. Смирнов¹*

Построение псевдораскраски для температурной шкалы термокрасок

¹ Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: palchikova@gmail.com

Аннотация. Визуальная информация о характеристике объекта может быть расширена путем сопоставления шкалы ее значений с цветовой шкалой. Термоиндикационные краски выполняют цветовую визуализацию изменения температуры объекта, соответствие характеристик указывается производителем в виде температурного цветового атласа термоиндикационной краски (ЦАТК). Однако визуальная оценка распределения температуры по поверхности объекта затруднена для оператора, если изменение цвета плохо различимо визуально. Разработана цветовая шкала для псевдораскраски изображений нагретых деталей, покрытых термоиндикационной краской, разработан способ взаимно однозначного сопоставления цветовых точек температурной шкалы, задаваемой ЦАТК, и точек цветовой шкалы псевдораскраски, в качестве которой предлагается дополнительный локус, в каждой цветовой точке которого значение яркости находится в диапазоне $125 \pm 0,5$ ед. градаций серого, а значение насыщенности цвета – в диапазоне $0,3094 \pm 0,0002$. Использование цветовой шкалы псевдораскраски исключает неоднозначность визуальной оценки цвета и определения температуры.

Ключевые слова: цифровое изображение, RGB-фотоприемник, локус, термоиндикационная краска, цветовая шкала, псевдораскраска

I. G. Palchikova¹, E. S. Smirnov¹*

Constructing a Pseudocolour for a Temperature Scale of Thermal Paints

¹ Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering of the Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: palchikova@gmail.com

Abstract. Visual information about an object characteristic can be enhanced by comparing its value scale with a colour scale. Thermo-indicating colours are used to visualise the temperature change of an object in colour, the matching characteristics are indicated by the manufacturer in the form of a temperature colour atlas of the Thermal Indication Paint Colour Atlas (TIPCA). However, visual evaluation of the temperature distribution on the surface of an object is difficult for the operator if the colour changes are not easily discernible visually. A colour scale has been developed for pseudo-colouring of images of heated parts coated with thermo-indicating paint; a method has been developed for mutually unambiguous comparison of colour points of the temperature scale given by the TIPCA and points of the colour scale of pseudo-colouring, as which an additional locus is proposed. It contains dots whose brightness is simultaneously in the range of $125 \pm 0,5$ units of grayscale and have a saturation in the range of $0,3094 \pm 0,0002$ units. The use of pseudo colour scale prevents ambiguity for the visual evaluation of colour and for the temperature definition.

Keywords: digital image, RGB receiver, locus, thermo-indicating paint, colour scale, pseudo-colouring

Введение

Для наглядного представления исследуемых характеристик объектов используется цветовая визуализация их значений. В системах автоматизированного проектирования цветовая визуализация характеристик выполняется путем сопоставления шкалы значений исследуемой характеристики с цветовой шкалой [1, 2]. Каждая отметка упорядоченного ряда шкалы значений соответствует определенному цвету (оттенку), что расширяет визуальную информацию о характеристике и об объекте. Цветовые шкалы достаточно широко применяются во многих областях науки и техники [3, 4]. В машиностроении существуют шкалы, отражающие изменение цвета объекта при технологическом воздействии на него, например: цвета побежалости стали, свечения (каления) металла (сплава) и др. [5]. Специальные цветовые шкалы используются для визуализации изменений исследуемых технологических признаков [6]. Так для определения температуры на поверхности изделий произвольной формы, в том числе на поверхности движущихся объектов, применяются термоиндикационные краски [7–9] практически во всех сферах промышленности и в исследовательской практике: машиностроении, авиационной промышленности, приборостроении, радиоэлектронике. При изменении температуры термокраска способна менять свой цвет. Каждое значение температуры соотносится со своим цветом, это соответствие указывается производителем в виде температурного цветового атласа термоиндикационной краски (ЦАТК). Однако в некоторых температурных диапазонах изменение цвета плохо различимо визуально, что затрудняет визуальную оценку распределения температуры по поверхности объекта. На сегодняшний день не существует общепринятого метода конструирования специальных цветовых шкал, в том числе шкал псевдораскраски, а процедуры формирования таких шкал в прикладном программном обеспечении скрыты от конечного пользователя.

Цель работы – разработка цветовой шкалы для псевдораскраски нагретых деталей, покрытых термокраской, разработка способа (алгоритма) взаимно однозначного сопоставления цветовых точек температурной шкалы, задаваемой ЦАТК, и точек цветовой шкалы псевдораскраски.

Материалы и методы

Для выполнения точных измерений в диапазоне температур от 30°C до 1280°C при испытаниях различных двигателей в авиационной промышленности применяются термоиндикационные краски. Однако далеко не всегда ЦАТК обеспечивает яркий и четкий цветовой контраст для визуального наблюдения оператором. В настоящей работе рассматривается ЦАТК [10] известной компании Hallcrest (Великобритания).

Наиболее полно отражает визуальную перцепцию человека такая численная характеристика цвета, как доминирующая длина волны (ДДВ) [11, 12], которая учитывает как свойства глаза оператора, так и источника света. В ряде задач сравнительные оценки цветовых характеристик [13, 14] образцов выполняются путем количественного выражения доминирующей длины волны (ДДВ) λ и

насыщенности цвета (НЦ) s , которые рассчитываются из значений RGB на цифровых изображениях, выполненных при оптимальном освещении, например, в специализированном светобоксе [15]. Возможно одновременно делать пересчет и в другие цветовые пространства.

На рис. 1 приводится изображение некоторых элементов ЦАТК [16] и соответствующих значений температур. На графике на рис. 2 показана рассчитанная зависимость средней по соответствующему элементу атласа ДДВ от температуры. Отчетливо выявляется неоднозначность этой зависимости в диапазоне от 570 до 1070 градусов Цельсия. Этот факт затрудняет для оператора точную визуальную идентификацию цвета и температуры.

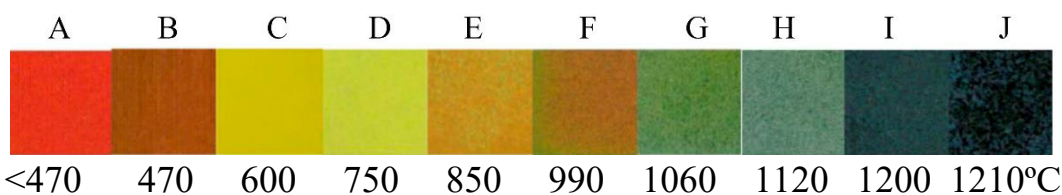


Рис.1. Изображение некоторых элементов рассматриваемого ЦАТК

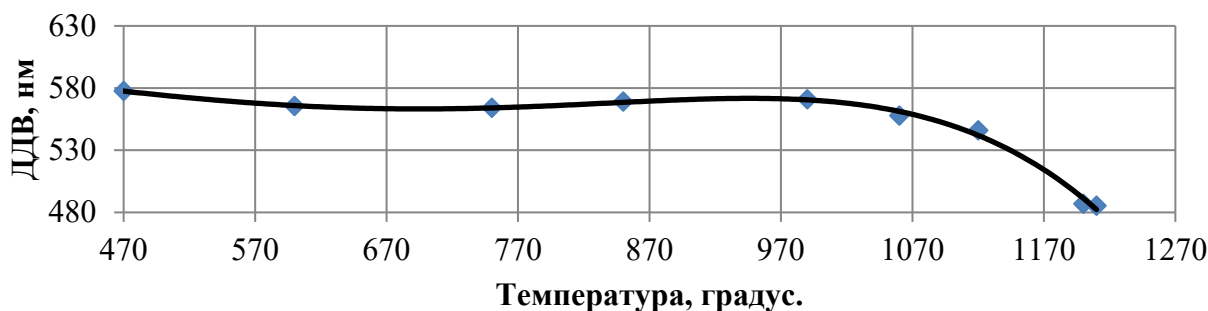


Рис.2. Зависимость ДДВ для ЦАТК от температуры

Однако, если для идентификации температуры использовать компьютерное зрение, то указанную неоднозначность можно преодолеть. На рис. 3 на цветовой плоскости (x,y) обозначен цветовой гамут, ограниченный спектральным локусом [17] с насыщенностью цветов, равной 1, треугольник RGB, дополнительный цветовой локус с насыщенностью цветов 0,309, и указаны цветочные точки A, B, C, D, E, F, G, H, I, J для каждого элемента ЦАТК, координаты этих точек находятся путем попиксельного усреднения по изображению каждого элемента ЦАТК. Ломаная линия A – J не имеет самопересечений, то есть каждая цветочная точка ЦАТК имеет уникальные значения координат x и y (а значит и RGB). Отрезки между точками содержат цветочные координаты (x,y) для скользящих среднеарифметических значений RGB между элементами ЦАТК в направлении от менее нагретых к более нагретым.

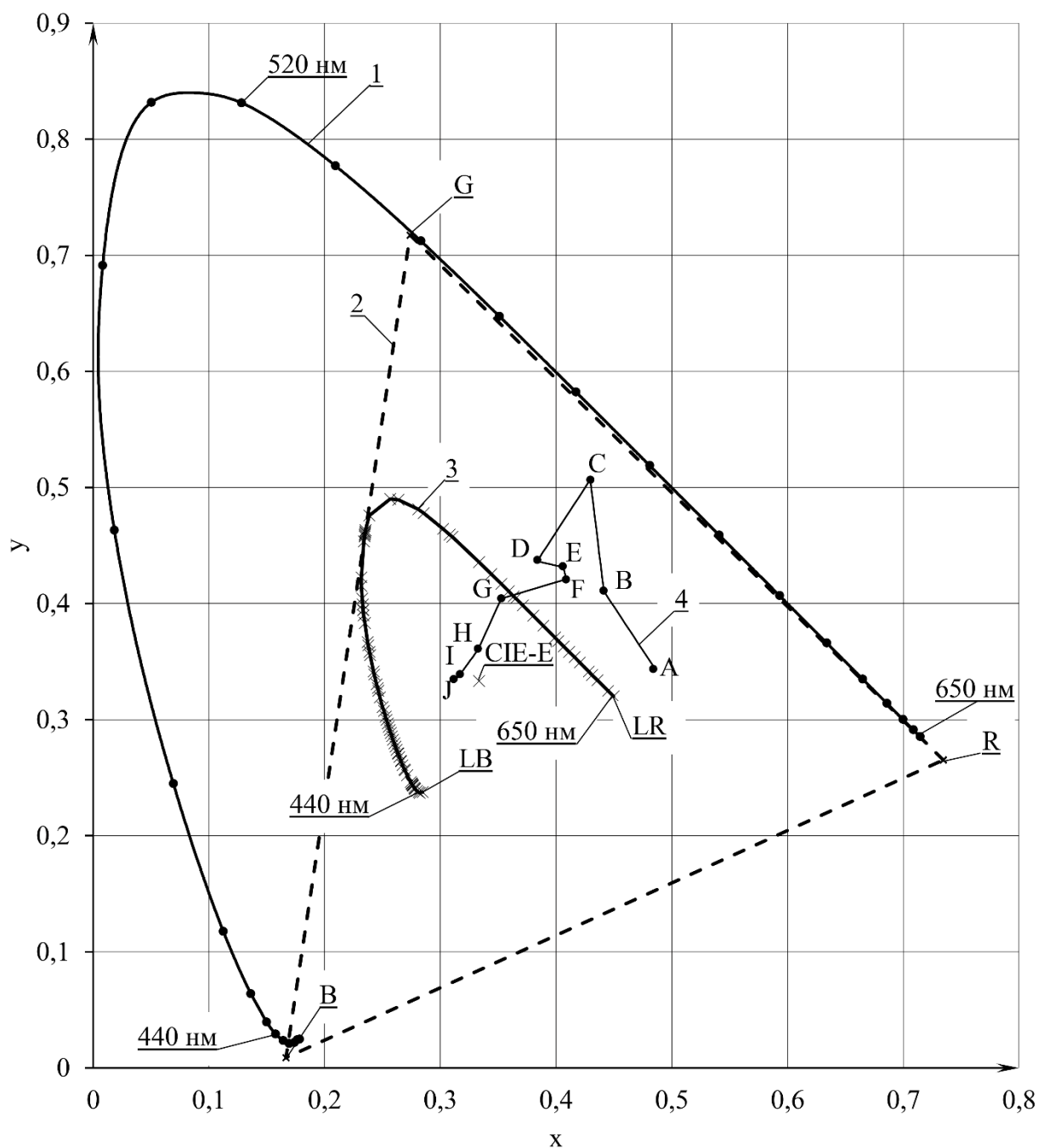


Рис. 3. Иллюстрация расположения цветных точек ЦАТК и шкалы псевдораскраски. 1 – спектральный locus, 2 – треугольник RGB, 3 – дополнительный цветовой locus с насыщенностью цветов 0,309, 4 – ломаная линия A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, в углах которой расположены цветные точки ЦАТК

Построим дополнительный locus, в каждой цветовой точке которого значение яркости зададим в диапазоне $125 \pm 0,5$ ед. градаций серого, значение насыщенности цвета – в диапазоне $0,3094 \pm 0,0002$. Цветовые координаты (x, y) каждой из точек этого locus выбираем из рассчитанного нами ранее [17, 18] набора

11182939 комбинаций RGB интенсивностей для равноэнергетического источника белого света СIE-E. Построенный дополнительный locus полностью лежит в пределах треугольника RGB, как показано на рис. 3, кривая 3. Такой locus удобно использовать в качестве шкалы псевдораскраски, потому что он содержит все цвета в видимом спектре с одинаковой яркостью и насыщенностью в пределах треугольника RGB.

Шкалу псевдораскраски формируем путем установления взаимно-однозначного соответствия цветовых точек ЦАТК и точек дополнительного locus. Взаимно-однозначное соответствие может быть построено различными способами.

Построим равномерную цветовую шкалу. На ломаной линии ЦАТК отметим и вычислим цветовые координаты точек, соответствующих 10 градусной разнице нагрева образца. Образует матрицу $K_{88 \times 3}$, первый столбец которой содержит значение температуры этих точек $k_{i,1}$, второй столбец – координаты вычисленных точек ЦАТК $k_{i,2}$. Первая точка – А ($k_{1,2}$), последняя – J ($k_{88,2}$), всего найдено 88 точек. На линии дополнительного locus LR – LB отметим и вычислим цветовые координаты 88 точек, распределенных равномерно, и поместим их в третий столбец матрицы, точка LR – это элемент матрицы $k_{1,3}$, точка LB – это элемент матрицы $k_{88,3}$. В матрице, построенной таким образом, все элементы каждой строки представляют одинаковое значение температуры, а все элементы каждого столбца задают шкалу температур. Таким образом, построены три шкалы температур для термоиндикационной краски. Элементы второго и третьего столбца являются цветовыми координатами с известными значениями RGB, поэтому легко находятся коэффициенты пересчета для координат между шкалами. Наглядное сопоставление шкал представлено на рис.4.

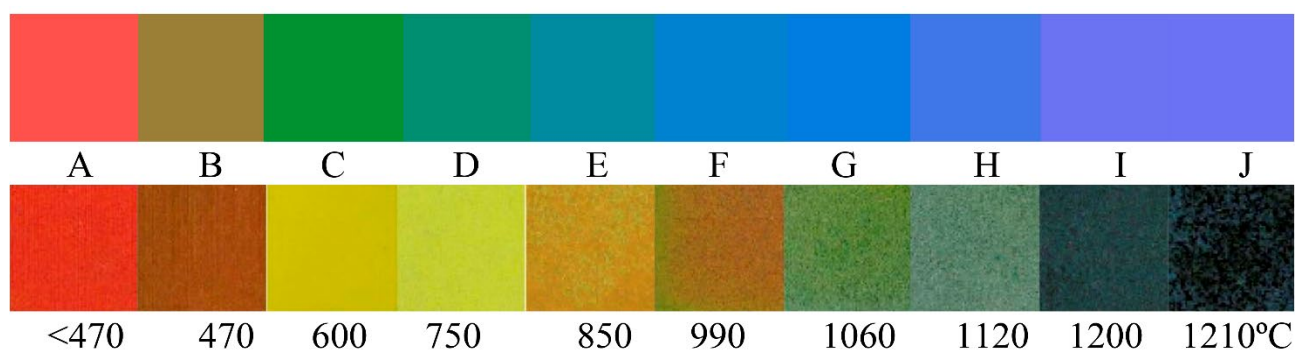


Рис.4. Визуализация температур ЦАТК по шкале дополнительного locus (верхний ряд), по шкале производителя термоиндикационной краски (нижний ряд)

Заключение и обсуждение

Показано, что дополнительный цветовой locus с насыщенностью цветов 0,309 может использоваться в качестве цветовой шкалы для псевдораскраски изображений нагретых деталей, покрытых термокраской. Разработан способ вза-

имно однозначного сопоставления цветowych точек температурной шкалы, задаваемой ЦАТК, и точек дополнительного цветового локуса. Использование цветовой шкалы псевдораскраски исключает неоднозначность визуальной оценки цвета и определения температуры.

Применение цветовой шкалы псевдораскраски существенно облегчает визуальный анализ температуры образцов, и он становится более продуктивным. Визуализация температурных изменений образцов с помощью псевдораскраски дает максимально возможное представление о состоянии образцов и позволяет человеку-оператору адекватно воспринимать представленную информацию.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Джадд Д., Вышецки Г. Цвет в науке и технике: Пер. с англ. М.: Мир, 1978. 592 с.
2. Kurowski P.M. Engineering Analysis with COSMOS Works Professional. Schroff Development Corporation, 2005. 236 p.
3. Levkowitz H., Herman G.T. The Design and Evaluation of Color Scales for Image Data// IEEE Computer Graphics and Applications, 1992, vol. 12, pp. 72–80.
4. Lovibond [Электронный ресурс]: For over 130 years, Lovibond® has specialized in manufacturing analytical products for water quality and color / Tintometer GmbH. Кройцлинген: Mesh Digital Limited, 2023. URL: <https://www.lovibond.com/en/PW/Colour-Measurement/Colour-Scales-Standards> (дата обращения: 07.05.2023).
5. Бернст Р., Бемер Й., Дитрих Г. и др. Технология термической обработки стали: Пер. с нем. М.: Металлургия, 1981. 608 с.
6. Брянский Л.Н., Дойников А.С., Крупин Б.Н. Метрология. Шкалы, эталоны, практика. М.: ВНИИФТРИ, 2004. 222 с.
7. SpotSee [Электронный ресурс]: Thermochromic technology / SpotSee. Сан-Франциско: Cloudflare, Inc., 2023. URL: <https://spotsee.io/technologies/thermochromic> (дата обращения: 07.05.2023).
8. Абрамович Б.Г. Термоиндикаторы и их применение. М., «Энергия», 1972. 224 с.
9. Эл-скада [Электронный ресурс]: Высокотемпературные термоиндикаторные краски EL-SCADA MAP / дизайн-студия «ДА!». Пермь: Webdepo-net, 2023. URL: <https://el-scada.ru/izmereniya/vyisokotemperaturnyie-termoindikatornyie-kraski/> (дата обращения: 07.05.2023).
10. An Essential Tool for the accurate analysis of high temperature rotating & stationary components [Электронный ресурс]: Why Use Thermal Paints? / Thermal Paint Services. Сиэтл: Amazon.com, Inc. (AMAZO-4), 2023. URL: <https://www.thermalpaintservices.com/why-use-thermal-paints-.html> (дата обращения: 07.05.2023).
11. MacAdam, D.L. Color measurement: theme and variations. Berlin: New York: Springer-Verlag, 1981. 229 p. ISBN: 9780387107738.
12. Пальчикова И.Г., Смирнов Е.С. Интервальная оценка параметров цвета из цифровых изображений // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 1. – С. 95–102. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-1-95-102.
13. Цветовой анализ цифровых изображений при производстве экспертных исследований следов выстрела / И.Г. Пальчикова, И.В. Латышов, В.А. Васильев, А.В. Кондаков, Е.С. Смирнов // Доклады Академии наук Высшей школы Российской Федерации. – 2015. – № 2(27). – С. 88–101.
14. Портативный цветовой анализатор качественных изменений мяса птицы / И.Г. Пальчикова, А.Ф. Алейников, Е.С. Смирнов, Ю.В. Чугуй, А.Н. Швыдков, К.Н. Нициевская, В.Ю. Сартаков, Т.В. Ярушин // Достижения науки и техники АПК. – 2015. – Т. 29, № 9. – С. 80–83.

15. Многофункциональный полупроводниковый осветитель / Пальчикова И.Г., Карамшук Е.В., Смирнов Е.С., Пальчиков Е.И., Самойленко М.С. // Доклады АН ВШ РФ. – 2020. – № 3 (48). – С. 62–74. DOI: 10.17212/1727-2769-2020-3-62-74.

16. MarkerPro [Электронный ресурс]: Термоиндикаторная краска Hallcrest MC/ Маркеры для профессионалов MarkerPro. Екатеринбург: INTERNET-PRO-NET, 2023. URL: <https://markerpro.ru/product/termoindikatornaya-kraska-hallcrest-mc/> (дата обращения: 31.03.2023).

17. Color and Vision Research Laboratory [Электронный ресурс]: Institute of Ophthalmology. Амстердам: RIPE Network Coordination Centre, 1995–2021. URL: <http://cvrl.ioo.ucl.ac.uk/> (дата обращения: 07.05.2023).

18. Palchikova I.G., Smirnov E.S., Palchikov E.Iv. Quantization noise as a determinant for color thresholds in machine vision // Journal of the Optical Society of America A. – 2018. – Vol. 35, Is.4 – P. B214 – B222. DOI: 10.1364/JOSAA.35.

© И. Г. Пальчикова, Е. С. Смирнов, 2023