

КОРРЕЛЯЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЦВЕТОВОГО СПЕКТРА И ВРЕМЕНИ ВЫПЕЧКИ ХЛЕБОБУЛОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ

В.К. Битюков, А.А. Хвостов, Д.И. Ребриков

*Кафедра «Информационные и управляющие системы», ГОУ ВПО «ВГТА»;
rebrikov-vgta@rambler.ru*

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

Ключевые слова и фразы: органолептические показатели качества; параметры распределения; цвет; цветовая модель HSL.

Аннотация: Рассматривается вопрос о возможности применения цифрового изображения для формирования цветового спектра с использованием цветовых моделей RGB и HSL. Показана возможность применения данного метода для контроля цвета как одного из первостепенных органолептических показателей пищевых продуктов на примере хлебобулочных изделий.

К основным показателям качества продукции, на которые потребитель обращает первоочередное внимание, и от которых зависит спрос на товар, можно отнести внешний вид, форму, цвет. Как выявлено в работе [1], весомость органолептических показателей качества для хлебобулочных изделий составляет: внешний вид – 0,34; форма – 0,15; цвет корки – 0,14. Поэтому как соблюдение, так и контроль данных параметров представляются важными в технологическом процессе.

В соответствии со стандартом качества ISO 9001:2001 органолептическую оценку проводят по пятибалльной шкале, отражающей все оценки, которые могут быть присущи данному виду продукта [2].

В условиях производства органолептические показатели определяются с помощью органов чувств человека. В связи с этим существуют определенные объективные и субъективные трудности в соблюдении условий для обеспечения органолептического анализа.

Субъективные трудности органолептической оценки заключаются в том, что ее проводит человек, а порог чувствительности и особенность восприятия цвета у каждого человека индивидуальны [3], вследствие этого один и тот же цвет разными людьми будет интерпретирован по-разному. Известно [3], что, кроме физических (оптических) факторов, воспринимаемый цвет зависит от физического и психологического состояния наблюдателя.

Объективные трудности связаны с физикой отражения и поглощения света. Различный спектральный состав света может давать одинаковый отклик на зрительных рецепторах, что не исключено в условиях производства. Это явление носит название «метамерия» [3].

Использование цвета в обработке изображений обусловлено двумя основными причинами. Во-первых, цвет является тем важным составляющим, который часто облегчает распознавание и выделение характерных признаков объекта на изображении. Во-вторых, человек в состоянии различать тысячи различных от-

тенков цвета, и всего лишь порядка двух десятков оттенков серого. Второе обстоятельство особенно важно при визуальном (то есть выполняемом непосредственно человеком) анализе изображений.

Рассматриваемые изображения обычно фиксируются цветными устройствами регистрации, такими как цветная камера. За последнее десятилетие цветные устройства ввода и аппаратные средства обработки цвета стали вполне доступны по ценам. Как результат, в настоящее время техника обработки изображений в натуральных цветах используется во многих приложениях.

Понятие цвета вводится при описании восприятия глазами человека электромагнитных волн в определенном диапазоне частот (длина волны λ от 400 нм (фиолетовый) до 780 нм (красный)). Таким образом, самым общим описанием светового потока может служить его спектральная функция $I(\lambda)$. Описание цвета заданием функции в большинстве случаев является слишком громоздким, хотя иногда и применяется.

Для того чтобы описание цветов сделать стандартным, введено понятие цветовой модели (называемой также цветовым пространством или системой цветов). Большинство современных цветовых моделей ориентированы либо на устройства цветовоспроизведения (цветные мониторы или принтеры), либо на определенные прикладные задачи (создание цветной графики), когда работа с цветом является непосредственной целью. Аппаратно-ориентированными цветовыми моделями, наиболее часто используемыми на практике, являются: модель RGB для цветных мониторов и широкого класса цветных видеокамер; модели CMY и CMYK для цветных принтеров; модель HSL, которая хорошо соответствует цветовосприятию человека. Последняя модель обладает также возможностью разделять цветовую и яркостную (полутоновую) информацию на изображении, что является преимуществом перед другими моделями.

В цветовой модели RGB [3–5] (от англ. Red, Green, Blue – красный, зеленый, голубой), спектральная функция представляется как сумма кривых чувствительности сетчатки человеческого глаза с неотрицательными весовыми коэффициентами (обычно их нормируют от 0 до 1), которые так и обозначаются – R, G и B. Эта модель характеризуется свойством аддитивности (сложение цветов для получения новых). В основе модели находится декартова система координат. Цветовое пространство представляет собой куб. Точки, отвечающие красному, зеленому и синему цветам, расположены в трех вершинах куба, лежащих на координатных осях. Голубой, пурпурный и желтый цвета расположены в трех других вершинах куба. Черный цвет находится в начале координат, а белый – в наиболее удаленной от начала координат вершине. В рассматриваемой модели оттенки серого цвета (точки с равными RGB значениями) лежат на диагонали, соединяющей черную и белую вершины. Различные цвета в этой модели представляют собой точки на поверхности или внутри куба и определяются вектором, проведенным в данную точку из начала координат.

Создание цветов в модели RGB является простой процедурой, и эта цветовая система идеально приспособлена для аппаратной реализации. Однако цветовая система RGB и другие подобные ей системы плохо приспособлены для описания цветов, свойственного человеку. Например, описывая цвет, человек не говорит о процентном содержании в нем каждого из основных цветов. Более того, рассматривая цветное изображение, человек не думает о том, что оно составлено из трех отдельных изображений – по одному для каждого первичного основного цвета. Глядя на окрашенный объект, человек описывает его с помощью цвета (цветового тона), насыщенности и светлоты. Цветовой тон является характеристикой, которая описывает собственно цвет (чистый желтый, оранжевый, красный и т.д.), тогда как насыщенность дает меру того, в какой степени некоторый чистый цвет разбавлен белым. Светлота (полутоновая яркость) является субъективной харак-

теристикой, которая практически не поддается измерению и является одним из ключевых параметров для описания цветового восприятия. Как известно интенсивность (яркость) – основная характеристика монохромных (полутонных) изображений. Эта величина измеряется и легко поддается интерпретации. В модели, которая носит название цветовая модель HSL (от англ. Hue, Saturation, Lightness – цветовой тон, насыщенность, светлота), яркостная информация (светлота) отделена от цветовой информации (цветовой тон, насыщенность) [4]. В результате модель HSL представляет собой эффективное средство для построения алгоритмов обработки изображений, поскольку в основе модели лежит естественное и интуитивно близкое человеку описание цвета, который, в конечном счете, является и разработчиком, и пользователем этих алгоритмов.

Как видно из описания, ни одна из моделей не описывает полную спектральную функцию света. Ввиду того что в современных цифровых системах оптической регистрации изображения используется цветовая модель RGB, которая пригодна для точки растра, а для спектральной функции поверхности необходима совокупность пикселей с основой HSL, можно сделать вывод, что получение цветового спектра технологической поверхности по цифровому изображению является затруднительным. Поэтому для решения поставленной задачи предлагается использовать представление изображения технологической поверхности в координатах Hue (цветовой тон) – Lightness (светлота) цветовой модели HSL, как наиболее информативных и удобных для анализа признаков.

Изначально цифровое изображение представлено в виде множества

$$Rb = \{Rb_p, p = \overline{1, P}\}, \quad (1)$$

где P – общее число пикселей изображения. После съемки получаем соответствующее множество цветовых координат, составляющих двумерную матрицу,

$$Rb \Rightarrow Rz, \quad Rz = \{Rz_{ij}, i = \overline{1, M}, j = \overline{1, N}\}. \quad (2)$$

Полученное изображение Rz достаточно просто описать с использованием цветовой модели RGB для каждого элемента матрицы Rz , так как в ЭВМ используется данная модель. После чего необходимо преобразовать полученное множество Rz из RGB пространства в HSL пространство.

Основываясь на концептуальном рассмотрении цветовых моделей RGB и HSL [3–5], видим, что необходимые для построения пространства HSL значения цветового тона, насыщенности и светлоты могут быть получены из координат R_c, G_c, B_c цветовой модели RGB.

Цветовой тон h для каждого пикселя, заданного в RGB формате изображения, определяется по формуле [3]

$$h = \begin{cases} \theta & \text{при } B_c \leq G_c, \\ 360 - \theta & \text{при } B_c > G_c, \end{cases} \quad (3)$$

где

$$\theta = \arccos \left\{ \frac{\frac{1}{2}[(R_c - G_c) + (R_c - B_c)]}{\left[(R_c - G_c)^2 + (R_c - B_c)(G_c - B_c) \right]^{1/2}} \right\}. \quad (4)$$

Насыщенность S определяется выражением

$$S = 1 - \frac{3}{Rc + Gc + Bc} [\min(Rc, Gc, Bc)]. \quad (5)$$

Светлота L определяется выражением

$$L = \frac{1}{3}(Rc + Gc + Bc). \quad (6)$$

Формулы приведены в предположении, что координаты Rc , Gc , Bc нормированы так, чтобы их значения лежали в диапазоне $[0, 1]$, и угол θ отсчитывался от красной оси пространства HSL. Значения компонент S и l автоматически попадают в диапазон $[0, 1]$ при условии, что значения Rc , Gc , Bc лежат в интервале $[0, 1]$.

Таким образом, выполнив все преобразования, мы получаем представление пикселя P_{ij} технологической поверхности в координатах Hue (цветовой тон) – Lightness (светлота) цветовой модели HSL (см. рис. 1).

Для анализа полученных кривых (как один из вариантов дальнейшего анализа и обработки) проведем их аппроксимацию.

Полученную в цветовом пространстве HSL кривую удобно описать дифференциальным уравнением, предложенным К. Пирсоном [6–8], которое подходит для описания многомодальных кривых следующего вида [7]

$$\frac{df(l)}{dh} = \frac{(h-a)f(l)}{b_0 + b_1h + b_2h^2}, \quad (7)$$

где величина h соответствует тону (Hue) в цветовой модели.

Данное уравнение отражает изменение величины l (светлоты) в зависимости от тона h (длины волны). Уравнение содержит четыре неизвестных параметра. Их вычисление основано на методе моментов, предложенным К. Пирсоном, – четыре выборочных момента приравниваются к соответствующим моментам теоретического распределения, являющимся функциями от неизвестных параметров. Решая полученную систему уравнений относительно неизвестных параметров, получают искомые оценки параметров в виде функций выборочных моментов [7]:

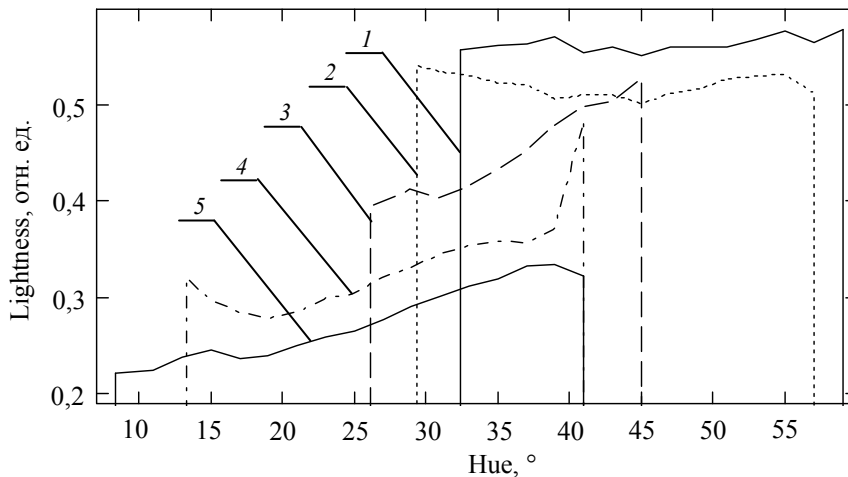


Рис. 1. Пример представления цвета корки хлеба в координатах цветовой модели HSL:

1 – 5 – графики, соответствующие продолжительности выпечки хлеба при 0, 9, 15, 18, 27 мин

$$\begin{aligned}
a &= \mu_3 (\mu_4 + 3\mu_2^2) / A; \\
b_0 &= -\mu_2 (4\mu_2\mu_4 - 3\mu_3^2) / A; \\
b_1 &= -\mu_3 (\mu_4 + 3\mu_2^2) / A; \\
b_2 &= -(2\mu_2\mu_4 - 3\mu_3^2 - 6\mu_3^2) / A; \\
A &= 10\mu_2\mu_4 - 18\mu_2^3 - 12\mu_3^2,
\end{aligned} \tag{8}$$

где $\mu_1 - \mu_4$ – моменты величины h , определяемые по формулам для дискретных величин,

$$\mu_1 = \frac{\sum_{i=1}^n h_i l_i}{\sum_{i=1}^n l_i}, \tag{9}$$

$$\mu_k = \frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \mu_1)^k l_i}{\sum_{i=1}^n l_i}. \tag{10}$$

Выражения $f(h)$ выводятся путем интегрирования дифференциального уравнения (7). Интегрирование позволяет получить 11 типов функций, три из которых являются основными, а остальные – их частными случаями.

Функция $f(h)$ сосредоточена на конечном интервале, если корни c_1 и c_2 уравнения $D_0 + D_1 h + D_2 h^2 = 0$ представляют собой действительные числа различных знаков.

Опуская подробности решения дифференциального уравнения, окончательно функция принимает вид

$$f_1(y) = \frac{y^\gamma (1-y)^\eta}{\beta(\gamma, \eta)}, \tag{11}$$

где $\beta(\gamma, \eta)$ – значение бета-функции; $0 \leq y \leq 1$; параметры γ и η определяемые по формулам:

$$\gamma = \frac{c_1}{D_2(c_1 + c_2)}, \quad \eta = \frac{c_2}{D_2(c_1 + c_2)}. \tag{12}$$

Переменная y определяется через исходный (нецентрированный и несмещенный) аргумент h по формуле

$$y = \frac{h - \theta_1}{\theta_2}, \tag{13}$$

где θ_1 и θ_2 – параметры центровки $\theta_1 = c_1 - \mu_1 - a$ и масштаба $\theta = c_1 + c_2$ аргумента h , которые определяют соответственно начало и ширину области действия данного пика на рис. 2. Соотношение между параметрами γ и η определяет положение максимума на кривой (положение моды) и находится по формуле

$$M = \frac{\gamma}{\gamma + \eta} \theta_2 + \theta_1. \tag{14}$$

Значения величин γ и η определяют ширину и высоту пика аппроксимирующей функции (см. рис. 2).

Таким образом, полученная кривая в области одного пика может быть описана при помощи функции (7).

Описание нескольких экстремумов на кривой загруженности можно представить в виде взвешенной суммы нескольких функций, соответствующих отдельным пикам,

$$l(h) = A + \sum_{j=1}^n k_j f_j(h). \quad (15)$$

Последовательность аппроксимации полученных данных включает следующие этапы:

- 1) разбиение графика на различные области отдельных пиков. Определяется по положению минимумов на кривой;
- 2) вычисление значения оценок первых четырех моментов эмпирического распределения путем обработки экспериментальных данных;
- 3) вычисление параметров D_0, D_1, D_2, a , переход от исходной переменной h к центрированной и смещенной переменной t ;
- 4) анализ корней квадратного уравнения c_1, c_2 , и определение типа функции;
- 5) вычисление параметров выбранного типа функции;
- 6) проверка согласованности полученного результата и экспериментальных данных с использованием критерия;
- 7) в случае недопустимого результата аппроксимации полученные параметры необходимо уточнить минимизацией ошибки с использованием метода наименьших квадратов.

Для примера, рассмотрим аппроксимацию кривой, полученной для тестовой заготовки со временем выпечки 35 мин в координатах цветовой модели HSL (см. рис. 2). Полученная функция имеет две моды, что соответствует количеству экстремумов. Применение данного подхода для аппроксимации функции в координатах цветовой модели HSL позволяет получить параметры: моды M ; центровки θ_1 и масштаба θ_2 , имеющие физический смысл. Они могут быть интерпретиро-

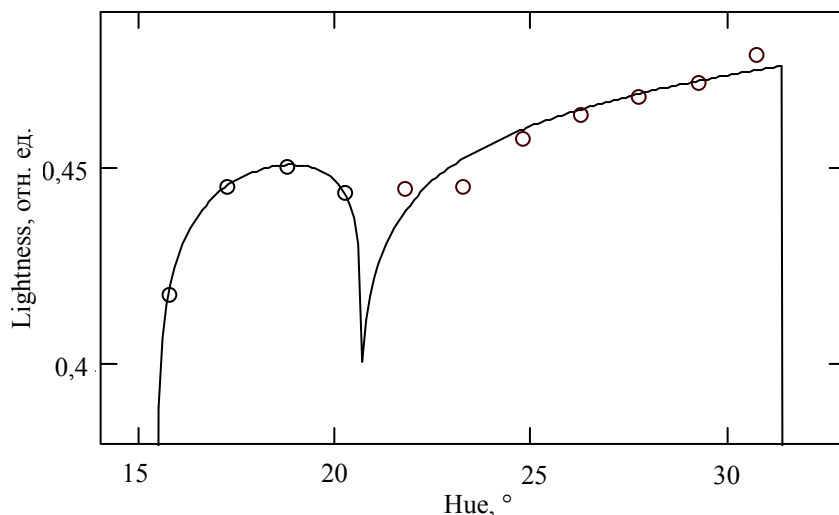


Рис. 2. Вид функции, полученной при аппроксимации исходной кривой:
 ○ исходные данные, — результирующая кривая

Таблица 1

**Примеры значений параметров аппроксимации
и коэффициента корреляции**

Параметр аппроксимации	Продолжительность выпечки, мин							Коэффициент корреляции	Критерий Стьюдента
	0	6	12	18	24	30	36		
μ_{11}	38,90	36,92	34,72	28,72	15,96	13,09	12,98	-0,922	-5,330
μ_{12}	52,96	51,93	44,98	39,23	31,68	32,57	30,59	-0,925	-5,462
μ_{21}	16,97	26,02	16,30	3,99	4,59	7,21	8,87	-0,618	-1,757
μ_{22}	16,49	12,00	2,88	16,27	41,60	59,19	47,79	0,773	2,720
μ_{31}	-5,46	8,64	4,10	-1,92	1,48	2,17	-4,71	-0,054	-0,120
μ_{32}	-2,07	-1,58	-0,33	-6,56	-34,54	-113,26	-46,54	-0,721	-2,329
μ_{41}	526,84	1171,3	446,37	24,38	34,23	86,01	142,88	-0,598	-1,669
μ_{42}	485,00	258,64	12,74	470,19	3108	6377	4166	0,794	2,923
θ_{11}	31,32	28,17	27,74	26,29	12,47	8,65	8,39	-0,910	-4,916
θ_{12}	46,13	46,08	42,61	32,78	21,48	21,41	19,55	-0,906	-4,781
θ_{21}	14,50	16,89	13,52	5,55	6,48	8,35	10,20	-0,603	-1,689
θ_{22}	13,89	11,95	4,91	13,66	22,03	25,94	24,02	0,702	2,202
γ_1	0,093	-0,173	-0,139	-0,356	-0,478	-0,375	0,06	-0,333	-0,790
γ_2	-0,018	0,007	-0,401	-0,011	0,028	0,048	0,08	0,323	0,763
η_1	-0,009	-0,09	-0,062	-0,745	-0,256	-0,216	-0,153	-0,271	-0,629
η_2	-0,055	-0,037	-0,506	-0,133	-0,127	-0,261	-0,082	-0,127	-0,286
M_1	45,68	39,28	37,12	28,08	16,68	13,95	11,25	-0,958	-7,430
M_2	49,61	43,71	44,79	33,81	25,41	25,42	31,46	-0,854	-3,677

ваны как длина волны, на которой сосредоточены основная интенсивность поверхности, максимальное значение цветового тона, начальный цвет и ширина охватываемого спектра цвета, что позволяет по количественным характеристикам оценить качественные.

С использованием экспериментальных данных по описанной методике для примера рассмотрим изменение параметров аппроксимирующей функции в зависимости от продолжительности выпечки хлеба, которые представлены в табл. 1.

Для проверки тесноты линейной связи между значениями параметров аппроксимации и продолжительностью выпечки необходимо определить коэффициент корреляции [7]:

$$r_j = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2}}, \quad (16)$$

где j – номер параметра; n – объем выборки; (x_i, y_i) – значения времени выпечки x_i и j -го параметра y_i .

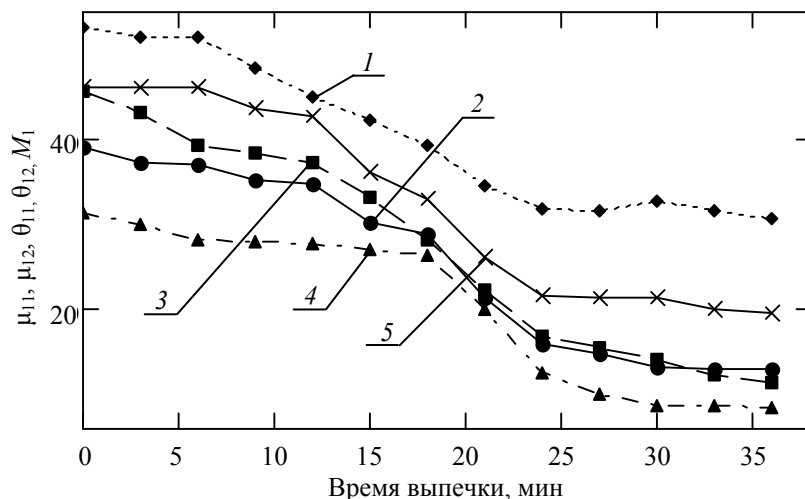


Рис. 3. Зависимость параметров модели от продолжительности выпечки:

1–5 – кривые изменения параметров аппроксимации μ_{12} , μ_{11} , M_1 , θ_{11} , θ_{12} , соответственно

Выполним проверку значимости коэффициента корреляции. Для этого воспользуемся правилом [7]: коэффициент корреляции r значимо (существенно) отличается от нуля, если

$$|t| = \frac{|r|\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} > t_{(1-\alpha);k}, \quad (17)$$

где $t_{(1-\alpha);k}$ – табличное значение t-критерия Стьюдента, определенное на уровне значимости α при числе степеней свободы $k = n - 2$. Для данного примера табличный критерий Стьюдента составил 2,571.

Анализируя полученные значения коэффициента корреляции (см. табл. 1), можно сделать вывод о зависимости таких параметров аппроксимации как первый момент μ_1 , параметр центровки θ_1 и значение моды M от продолжительности времени выпечки хлеба (см. рис. 3), что также вытекает из физического смысла данных параметров. При выпечке хлеба цвет от бледного, который в цветовой модели HSL представлен цветовым тоном в области 60° , переходит в золотистый, что в модели HSL выражается изменением цветового тона с 60 до 0° , то есть переходом в область красного цвета.

Таким образом, мы получили возможность в режиме реального времени определять функцию цветового спектра поверхности. Параметры полученной зависимости, аппроксимирующей цветовой спектр, коррелируют с продолжительностью выпечки, что может быть положено в основу системы, заменяющей визуальный контроль органолептических показателей в условиях производства.

Список литературы

1. Комплексная оценка качества хлебобулочных изделий / Е. Пономарева [и др.] // Хлебопродукты. – 2008. – № 3. – С. 54–55.
2. Мазалова, Л. Сенсорная оценка специализированных жиров / Л. Мазалова // Хлебопечение России. – 2007. – № 5. – С. 18.
3. Гуревич, М.М. Цвет и его измерение / М.М. Гуревич. – М. : Мир, 1966. – 512 с.
4. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М. : Техносфера, 2005. – 1072 с.
5. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений в среде MatLab / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. – М. : Техносфера, 2006. – 616 с.

6. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман. – М. : Высшая школа, 1999. – 428 с.
7. Кендалл, М. Теория распределений : пер. с англ. / М. Кендалл, А. Стьюарт. – М. : Наука, 1966. – 588 с.
8. Крамер, Г. Математические методы статистики / Г. Крамер. – М. : Мир, 1975. – 648 с.

Estimation of Correlation between Color Spectrum Parameters and Baking Time of Bakery Products

V.K. Bityukov, A.A. Khvostov, D.I. Rebrikov

Department "Information and Control Systems", VGTA; rebrikov-vgta@rambler.ru

Key words and phrases: color; distribution parameters; HSL color model; organoleptical quality indexes.

Abstract: The paper studies the possibility of using color image for color spectrum definition through RGB and HSL color models. The paper shows the possibility of this technique application to control color as one of the essential organoleptical indexes of food stuffs illustrated by bakery products.

References

1. Complex estimation of quality bakery products / Ye. Ponomaryova [et al.] // *Khleboproducty*. – 2008. – № 3. – P. 54–55.
2. Mazalova, L. Touch estimation of specialized fats / L. Mazalova // *Hlebopechenie in Russia*. – 2007. – № 5. – P. 18.
3. Gurevich, M.M. Colour and its measurement / M.M. Gurevich. – М. : Mir, 1966. – 512 p.
4. Gonsales, R. Digital processing of images / R. Gonsales, R. Woods. – М. : Technosphera, 2005. – 1072 p.
5. Gonsales, R. Digital processing of images in environment of MatLab / R. Gonsales, R. Woods, S. Eddins. – М. : Technosphera, 2006. – 616 p.
6. Gmurman, V.E. Probability theory and mathematical statistics / V.E. Gmurman. – М. : Visshaya school, 1999. – 428 p.
7. Kendall, M. Theory of distributions : transl. from English / M. Kendall, A. Stuart. – М. : Nauka, 1966. – 588 p.
8. Kramer, H. Mathematical methods of statistics / H. Kramer. – М. : Mir, 1975. – 648 p.

Einschätzung der Korrelation der Parameter des Farbspektrums mit der Backenzeit von Gebäcke

Zusammenfassung: Es wird die Frage über der Möglichkeit der Benutzung des Digitalbildes für die Formierung des Farbspektrums mit der Benutzung der Farbmodelle RGB und HSL betrachtet. Es ist die Möglichkeit der Benutzung dieser Methode als einer der erstklassigen organoleptischen Kennwerten der Nahrungsmittel am Beispiel der Gebäcke gezeigt.

Evaluation de la corrélation des paramètres du spectre de couleur avec le temps de la cuisson du pain

Résumé: Est examinée la question de la possibilité de l'utilisation de l'image numérique pour la formation du spectre de couleur avec l'emploi des modèles RGB et HSL. Est montrée la possibilité de l'application de la méthode donnée pour le contrôle de la couleur comme un des indices organoleptiques primordiaux des produits alimentaires à l'exemple du pain.

Авторы: *Битюков Виталий Ксенофонович* – президент ГОУ ВПО «ВГТА», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные и управляющие системы»; *Хвостов Анатолий Анатольевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные и управляющие системы»; *Ребриков Дмитрий Иванович* – ассистент кафедры «Информационные и управляющие системы», ГОУ ВПО «ВГТА».

Рецензент *Дворецкий Станислав Иванович* – доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе, заведующий кафедрой «Технологическое оборудование и пищевые технологии» ГОУ ВПО «ТГТУ».
