

УДК 519.8:61

Профессор В.К. Битюков, доцент А.А. Хвостов,
старший преподаватель Д.И. Ребриков

(Воронеж. гос. ун. инж. технол.) кафедра информационных и управляющих систем,
тел. (473) 255-38-75

Управление процессом выпечки хлебобулочных изделий на основе математической модели динамики изменения цвета корки

В статье предложена система поддержки принятия решения по управлению процессом выпечки хлебобулочных изделий на основе оценки показателя качества – цвета поверхности изделия и математической модели динамики изменения этого показателя.

In this article a support system of making decision about control of baking process of bread on the basis of estimating the quality (the colors of the product surface and the mathematical model of the dynamics of change in this indicator) is offered.

Ключевые слова: математическая модель, динамика цвета корки, система поддержки принятия решения.

Учет цвета поверхности хлебобулочного изделия, получаемого в процессе выпечки, имеет большое значение для обеспечения заданных качественных характеристик готового хлебобулочного изделия [1].

Управление цветом ХБИ может осуществляться на основе математической модели, отражающей динамику изменения цвета корки изделия [2].

В работе [2] разработана математическая модель, позволяющая в режиме реального времени осуществлять идентификацию цветового показателя качества процесса выпечки изделия по экспериментальным данным – текущим значениям цвета и температуре корки хлебобулочного изделия.

Ввиду наличия неконтролируемых возмущений, связанных с неоднородностью используемого сырья по составу и наличию микропримесей при производстве хлебобулочных изделий (ХБИ) [1], параметры математической модели кинетики показателя цветности [2] могут изменяться от партии к партии, а также от неучтенных в математической модели влажности воздуха, конвекции теплообмена около поверхности и т.д. Для компенсации этих возмущений предлагается использовать процедуру текущей идентификации, позволяющей оперативно корректировать параметры математической модели кинетики показателя цветности (1) по текущим измерениям показателя в

начальном этапе выпечки. Дальнейшие расчеты и выдачу рекомендаций предлагается вести по оперативным измерениям и новым параметрам математической модели.

Разработка системы поддержки принятия решения (СППР) по управлению процессом выпечки на основе методики оценки показателя цветности поверхности ХБИ [3] и математической модели кинетики изменения этого показателя [2] заключается в построении процедур вычисления времени достижения заданного показателя цветности при определенных начальных условиях и оценке достижения заданного качества при известных времени выпечки и начальных условиях. Вычисленные значения предлагается оформлять в виде рекомендаций технологу-оператору по изменению управляющих воздействий на объект управления. В данном случае используются время выпечки и температура.

СППР выдает рекомендации по изменению температуры выпечки в пределах технологического регламента, при которой будет гарантировано достижение заданного значения показателя цветности или изменение времени выпечки для достижения той же цели.

Алгоритм получения, обработки информации и выдачи рекомендаций функционирует представленным ниже образом.

После ввода регламентных значений времени и температуры выпечки осуществляется загрузка ХБИ и выпечка. При этом по-

стоянно с заданной периодичностью осуществляется получение цифровых изображений поверхности ХБИ, их обработка и расчет цвета корки [3]. По истечении заданного времени осуществляется процедура текущей идентификации и уточнение параметров $k_0, k_1, k_T, E_{Acol}, Q_{Тмяк}$ математической модели (1). После проверки адекватности модели экспериментальным данным и оценки погрешности расчетов проверяется попадание значения показателя цвета корки C_{col} после истечения времени выпечки $C_{col}(t_{кон})$ в заданный регламентом диапазон значений $C_{col}(t) \in C_{col}^*$. В случае попадания значения показателя цвета в заданный диапазон СППР выдает сообщение о нормальном ходе технологического процесса и коррекция температуры и времени пребывания не требуется. В случае выхода значения показателя

качества за пределы регламентного диапазона если $C_{col}(t_{кон}) < C_{col}^*$ ситуация означает чрезмерно темную поверхность ХБИ, что может быть вызвано целым рядом причин. В этом случае необходимо снизить температуру или уменьшить время выпечки ХБИ, оставаясь при этом в рамках температурно-временного регламента. По математической модели просчитываются варианты обеспечивающие условия $C_{col}^{*min} < C_{col} < C_{col}^{*max}$. В диалоговом режиме технологу-оператору представляются варианты изменений температуры и времени выпечки для принятия решений по управлению процессом. Для полноты восприятия развития процесса выпечки во времени оператору предлагается графическое изображение кривых $C_{col}(t)$ в виде, представленном на рис.1.

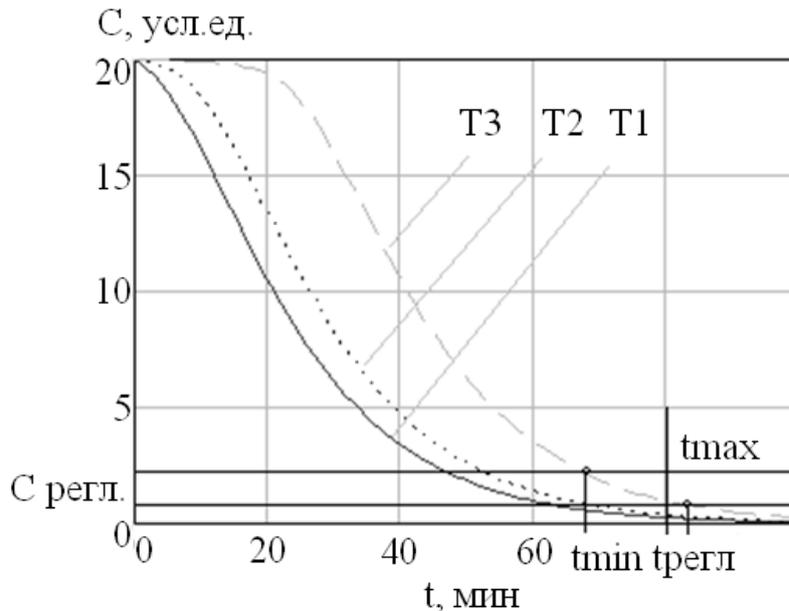


Рис. 1. Представление текущего процесса и прогноза выпечки ХБИ для технолога-оператора.

При этом за ЛПР остается выбор засчет каких управляющих воздействий будет достигнуто заданное значение показателя цвета корки ХБИ. Структура математической модели имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{dC_{col}(t)}{dt} = k_0 e^{\frac{E_{Acol}}{RT_{кор}}} C_{col}(t), \\ \frac{dT_{кор}}{dt} = k_T (T_{возд} - T_{кор}) e^{\frac{k_1}{T_{кор}}} - Q_{Тмяк} (T_{кор} - T_{мяк}), \\ C_{col}(0) = C_{col0}, T_{кор}(0) = T_{кор0}, \end{cases} \quad (1)$$

где k_0 – скорость химических реакций, приводящих к образованию пигментных веществ при некоторой фиксированной температуре; k_1 – поправочный температурный коэффициент; k_T - константа скорости изменения температуры корки ХБИ со временем; $T_{возд}$ - температура воздуха в пекарной камере, °С; $Q_{Тмяк}$ - теплота, отводимая мякишем хлеба, Дж; E_{Acol} - эффективная энергия активации реакций, приводящих к образованию пигментных веществ, кДж/моль; R – универсальная газовая постоянная кДж/(К·моль); $T_{кор}$ – температура корки ХБИ, °С.

Для обеспечения высокой точности прогноза значения окраски корки ХБИ необходимо иметь минимальное и достаточное множество измерений этого показателя в ходе технологического процесса.

Для этого необходимо с использованием математической модели (1) провести серию вычислительных экспериментов по заданию разных диапазонов текущей идентификации для расчета показателя цвета при заданных времени выпечки или времени выпечки при заданном значении показателе качества цвета корки. Это позволит определить временной интервал, в течение которого будет осуществляться процедура текущей идентификации математической модели и при этом будет обеспечена приемлемая точность прогноза показателя качества. Вычислительный эксперимент организован следующим образом. По имеющимся экспериментальным данным, снятым в процессе штатной выпечки выбранной марки ХБИ, производится выбор крайних значений показателя цвета корки в начале и в конце процесса выпечки для реали-

зации наибольшего разброса по этому показателю и большей представительности данных. Далее производится параметрическая идентификация математической модели динамики изменения показателя цветности по имеющимся экспериментальным данным. Следующий этап заключается в последовательном увеличении количества экспериментальных точек расчета и одновременной оценке достигаемой точности прогноза окраски корки. По достижении заданного предела по погрешности расчета фиксируется текущее время. За приемлемое время текущей идентификации принимается максимальное значение времени, при котором достигнута заданная точность прогноза. Для определения приемлемого времени текущей идентификации произведем параметрическую идентификацию математической моделью (1) для экспериментальных данных, полученных в диапазоне с 4 по 18-ую минуты выпечки тестовой заготовки. Результаты идентификации представлены в таблице, где Δ - абсолютная погрешность, δ - относительная погрешность.

Т а б л и ц а

Результаты идентификации экспериментальных данных по выпечке тестовой заготовки математической моделью (1).

| Диапазон выборки, мин | | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 |
|-------------------------------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Параметр модели (1) k_1 | | 112.3 | 113.8 | 110.6 | 108.9 | 105.5 | 103.3 | 104.3 | 104.6 |
| Критерий Фишера | Фрасч.(С) | 18,525 | 18,524 | 18,526 | 18,528 | 18,531 | 18,533 | 18,535 | 18,531 |
| | Фрасч.(Т) | 11,983 | 8,983 | 17,069 | 25,173 | 43,85 | 36,944 | 42,319 | 43,482 |
| Погрешность прогноза по цвету | ΔC , отн.ед | 1,071 | 1,069 | 1,072 | 1,074 | 1,077 | 1,079 | 1,079 | 1,078 |
| | δC , % | 3,334 | 3,329 | 3,339 | 3,344 | 3,354 | 3,361 | 3,358 | 3,357 |
| Погрешность прогноза по температуре | ΔT , °C | 0,718 | 2,301 | 0,968 | 2,629 | 5,75 | 7,638 | 6,796 | 6,484 |
| | δT , % | 0,573 | 1,838 | 0,773 | 2,1 | 4,593 | 6,101 | 5,428 | 5,179 |

Для осуществления параметрической идентификации использовался критерий вида:

$$S = \sum_{i=1}^N (C_{\text{эксн}_i} - C_{\text{расч}_i})^2. \quad (2)$$

Методом покоординатного спуска найдены параметры, минимизирующие критерий (2).

$$S = \sum_{i=1}^N \left(C_{\text{эксн}_i} - C_{\text{расч}_i} \right)^2 \longrightarrow \min. \quad (3)$$

$k_0, E_{\text{Асол}}, k_T$

При этом в ходе выполнения алгоритма параметры модели (1) $k_0, k_T, E_{\text{Асол}}, Q_{\text{Тмяк}}$ были определены на полной выборке экспериментальных данных и зафиксированы их значе-

ния: $k_0 = 0,039$, $E_{\text{Асол}} = 45,769$, $k_T = 0,323$, $Q_{\text{Тмяк}} = 0,134$. Определялся параметр k_1 , который в модели (1) является поправочным температурным коэффициентом.

Проверка адекватности по критерию Фишера [4] выполнена для каждого шага идентификации, результаты представлены в табл. 1. Минимальное табличное значение критерия Фишера для рассматриваемого случая составило 2.69 [4].

Как видно из рис. 2 и 3 результаты прогнозирования моделью (1) совпадают с данными, полученными в ходе выполнения эксперимента, что также говорит о верном подходе.

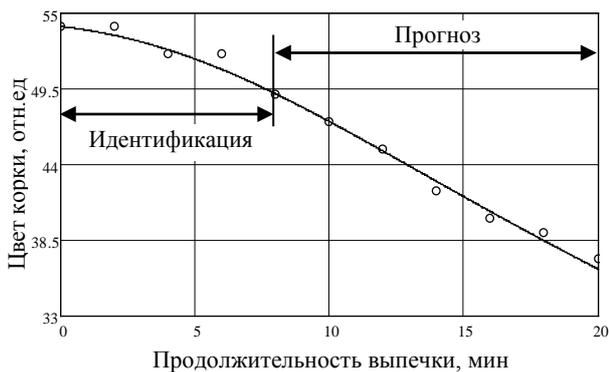


Рис. 2. Результат идентификации моделью (1) экспериментальных значений для цвета корки на 8-ой минуте выпечки. $\circ\circ$ – экспериментальные, — – расчетные значения цвета корки.

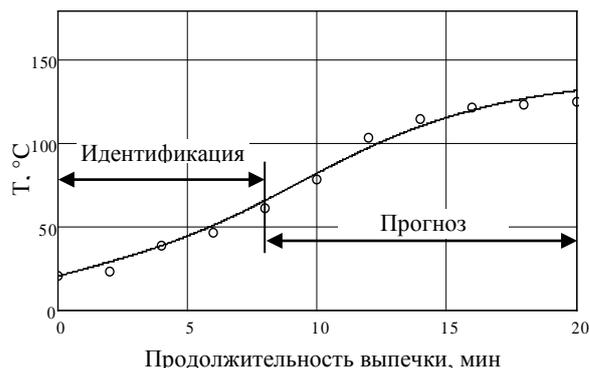


Рис. 3. Результат идентификации моделью (1) экспериментальных значений для температуры корки на 8-ой минуте выпечки. $\circ\circ$ – экспериментальные, — – расчетные значения температуры.

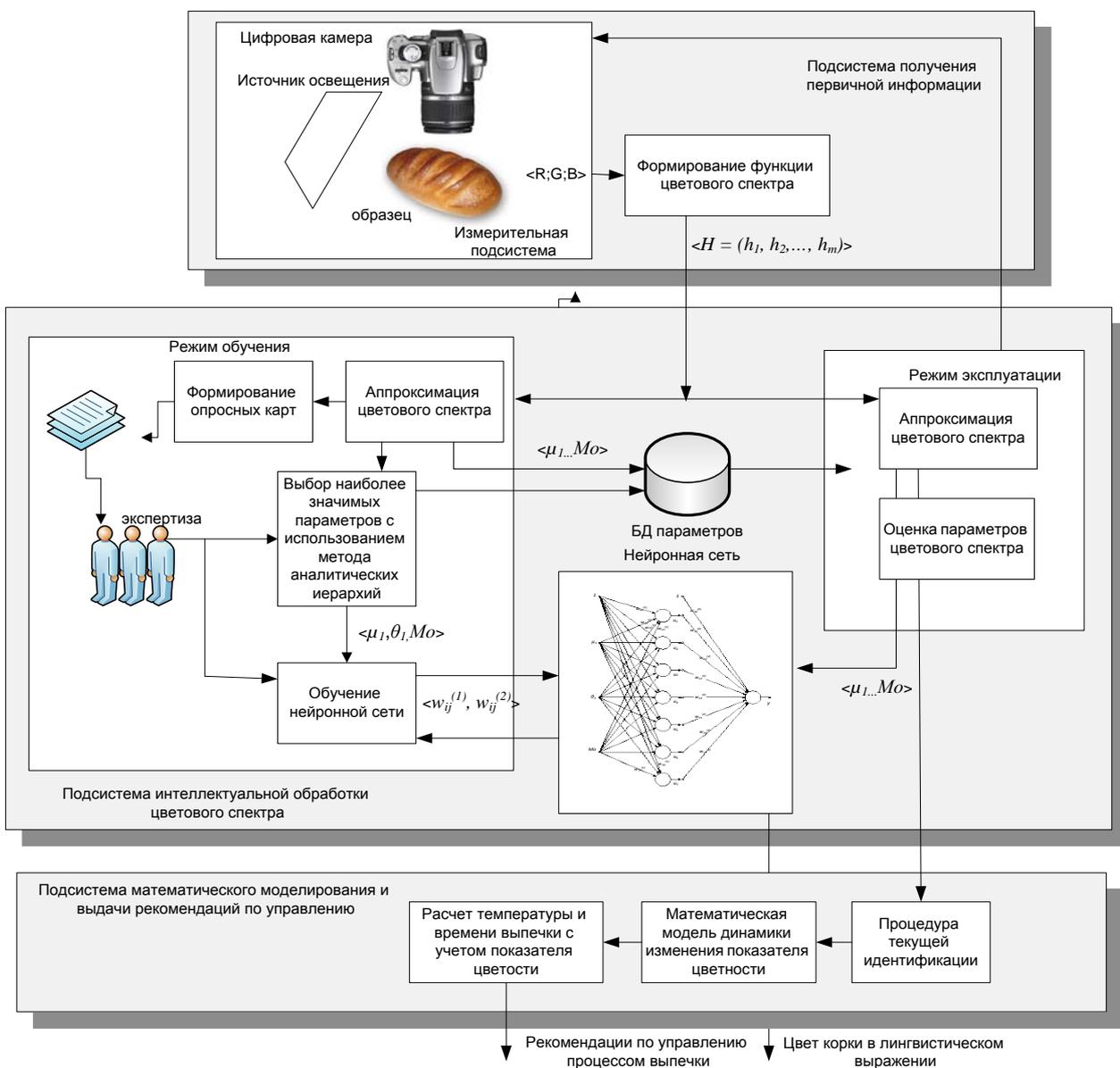


Рис. 4. Структура системы поддержки принятия решений в управлении процессом выпечки ХБИ на основе математической модели динамики изменения цвета корки.

Погрешность прогноза определялась для конечной 20-ой минуты процесса выпечки.

Как видно из табл. математическая модель (1) позволяет получить достаточную точность прогноза уже на 4-ой минуте выпечки тестовой заготовки.

По итогам работы синтезирована структура СППР (рис. 4). Предложена модульная трехуровневая структура, включающая уровни: 1) получения первичной информации об объекте; 2) интеллектуальной обработки данных для расчета показателя качества; 3) математического моделирования динамики изменения показателя цветности и выдачи рекомендаций по управлению.

ЛИТЕРАТУРА

1 Ауэрман, Л. Я. Технология хлебопекарного производства [Текст]: учебник / Л.Я. Ауэрман. – 9-е изд.; перераб. и доп. – СПб: Профессия, 2003. – 416 с.

2 Чертов, Е. Д. Математическая модель динамики цвета корки в процессе выпечки [Текст] / Чертов Е.Д., Хвостов А.А., Ребриков Д.И., Шторх Л.В. // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2012. – №1. – С. 49-53.

3 Битюков, В. К. Автоматизированная система контроля качества цвета хлебобулочных изделий [Текст] / В.К. Битюков, А.А. Хвостов, Д.И. Ребриков, С.С. Рылев // Вестник Воронежской государственной технологической академии. – 2011. – №2. – С. 40–44.

4 Грановский, В. А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях [Текст] / В.А. Грановский, Т.Н. Сирая. – Л.: Энергоатомиздат, 1990 г. – 280 с.

REFERENCES

1 Auerman, L. Ya. Technology of bakery production [Text]: textbook / L.Ya. Auerman. it is 9th edition.; proc. and compl. – SPb: Profession, 2003. – 416 p.

2 Chertov, E. D. Mathematical model of dynamics of color of crust in the process of baking [Text] / Chertov E.D., Khvostov A.A., Rebrikov D.I., Shtorkh L.V. // Proceedings of the Voronezh state university of engineering technologies. – 2012. – №1. – P. 49-53.

3 Bityukov, V. K. Automated control of color quality bakery products [Text] / V.K. Bityukov, A.A. Khvostov, D.I. Rebrikov, S.S. Rylev // Proceedings of the Voronezh state university of engineering technologies. - 2011. - № 2. - P. 40-44.

4 Granovsky, V. A. Methods of data processing in the measurements [Text] / V.A. Granovsky, T.N. Siraya. - L. Energoatomizdat, 1990 - 280 p.