

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

УДК 004.94

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ЗЕЛЕННОГО ЧАЯ

К.Б. ФАМ, асп., П.М. МУРАШЕВ асп., В.Н. БОГАТИКОВ, д-р техн. наук

Тверской государственный технический университет
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: phambang79520897405@gmail.com

© Фам К.Б., Мурашев П.М., Богатиков В.Н., 2023

В работе описаны проектирование и моделирование с использованием MatLab и Simulink процесса сушки зеленого чая в конвейерно-ленточной сушилке при нечеткой аппроксимации зависимости равновесной влажности чая от его относительной влажности и температуры. На основе сравнения расчетных кривых по разработанной модели, а также на базе имеющихся экспериментальных данных о сушке зеленого чая в конвейерной сушилке сделан вывод об их удовлетворительной сходимости. Полученные модели рекомендованы для практического применения.

Ключевые слова: сушка зеленого чая, теория нечетких множеств, математическая модель сушки, равновесная влажность, влажность зеленого чая.

DOI: 10.46573/2658-5030-2023-3-71-83

ВВЕДЕНИЕ

Широко известный напиток чай популярен во всем мире благодаря своим лечебным свойствам [1]. Важным элементом в нем являются полифенолы, которые представляют собой тип микроэлементов, способствующих улучшению здоровья человека. Они также присутствуют во многих овощах и фруктах. Растительные полифенолы богаты антиоксидантами, которые помогают остановить вредоносное действие свободных радикалов и предотвратить повреждение клеток, снижая таким образом риск развития хронических заболеваний. Полифенолы выполняют и множество других полезных функций: от контроля уровня сахара в крови до уменьшения риска образования тромба [2]. Кроме того, положительное влияние на организм чай оказывает при ожирении, микробном атеросклерозе и раке, включая рак толстой кишки, простаты, легких, молочной железы и кожи.

Чтобы потребитель получил качественный чайный продукт, свежие листья зеленого чая должны пройти множество сложных стадий обработки, и одним из важных этапов является сушка. Она не только способствует продлению срока хранения и предотвращению роста вредных химических веществ, но и придает листьям правильные форму, цвет и вкус.

Математическое описание процесса сушки основано на использовании дифференциальных уравнений теплопроводности. При синтезе таких уравнений необходимо учитывать массообменные процессы, процессы теплопроводности и теплообмена. Математическое описание подобных процессов в большинстве своем носит нелинейный характер, обусловленный как неопределенностью в знаниях о параметрах самих процессов, так и нелинейностью их взаимосвязей. Поэтому при

решении дифференциальных уравнений математического описания обычно возникают определенные трудности. Чтобы справиться с ними, в настоящей работе использовали результаты экспериментов, инженерные опыты и теорию нечетких множеств [3].

ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Схематический вид конвейерно-ленточной сушилки для зеленого чая представлен на рис. 1. Вначале воздух поступает в подогреватель, а затем, после достижения необходимой температуры, уже горячий воздух в сушильной камере контактирует с чаем, обеспечивая тепло для испарения влаги. В процессе сушки воздух движется с большой скоростью, поэтому часть чая будет выдуваться вместе с воздухом из сушильной камеры. Для извлечения этой части продукта на выходе ставится циклон. Из сушильной камеры воздух поступает в циклон для отделения частиц чая. Затем отработанный воздух выбрасывается в окружающую среду, а сухие материалы смешиваются с готовым продуктом.

Зеленый чай с повышенной влажностью подается в сушильную камеру по конвейеру, движется по конвейерной ленте перпендикулярно направлению движения горячего воздуха и получает тепло непосредственно от него в процессе сушки.

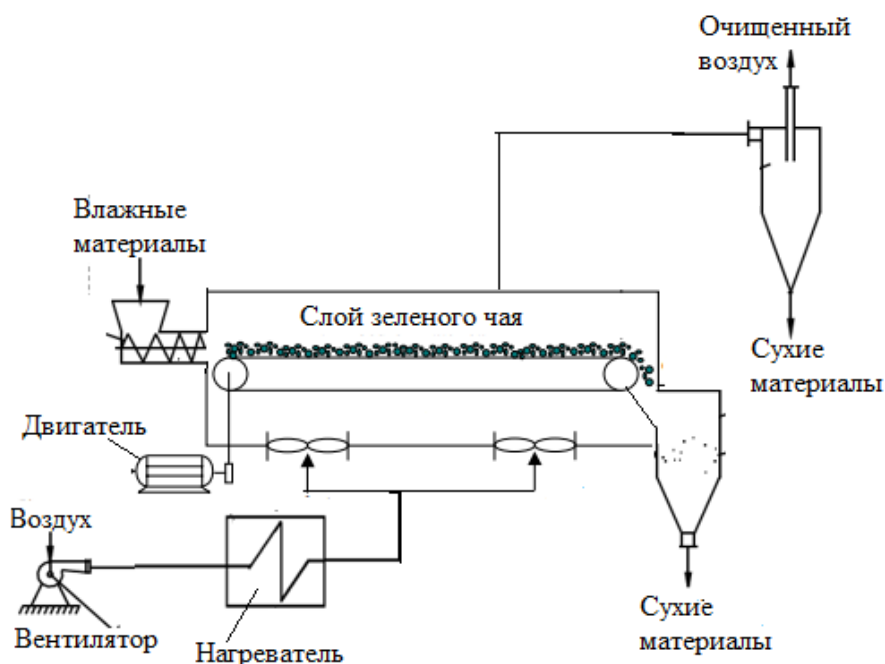


Рис. 1. Технологическая схема сушки зеленого чая

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Математическое описание конвейерной сушилки с непосредственным контактом включает уравнения балансов массы и энергии твердой и газовой фаз, которые связаны с временем удерживания [4] и моделями теплообмена.

Предлагаемая динамическая модель имеет важные упрощения:

- 1) зеленый чай представляет собой пористый материал, включающий жидкую и твердую фазы;
- 2) перенос массы и тепла представляет собой комбинацию одновременных внутренних и внешних конечных сопротивлений;
- 3) усадка чая не влияет на скорость сушки.

Уравнение материального баланса в зеленом чае:

$$\frac{\partial M(x,t)}{\partial t} = -v_s \frac{\partial M(x,t)}{\partial x} - K(M(x,t) - M_e), \quad (1)$$

где M – влажность листьев зеленого чая, кг/кг; v_s – скорость движения ленты, м/с; K – коэффициент массообмена, кг/(м²·с); M_e – равновесная влажность листьев чая, кг/кг.

Уравнение энергетического баланса:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = -v_s \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} - \frac{K(M(x,t)-M_e)}{C_{ps}+C_{pw}M(x,t)} \left(C_{pv}(T_c - T(x,t)) + \lambda + C_{pw}T(x,t) \right) + \frac{h(T_c-T(x,t))}{C_{ps}+C_{pw}M(x,t)}, \quad (2)$$

где T – температура слоя зеленого чая, °С; T_c – температура воздуха, °С; h – коэффициент теплопередачи, описывающий конвективный поток тепла от воздуха к листьям, Вт/(м²·°С); λ – скрытая теплота испарения воды, Дж/кг.

В уравнении (2) C_{ps} , C_{pw} и C_{pv} – удельные теплоемкости листьев, жидкой воды и водяного пара соответственно. Значения C_{ps} листьев чая измеряли методом дифференциальной сканирующей калориметрии (DSC Q2000, TA Instruments). Средние значения были равны 1 720 Дж/(кг·°С). Коэффициент массообмена в уравнениях (1) и (2) менялся по времени, он зависит от скорости воздуха и его температуры [3] в камере и вычисляется по уравнению

$$K = 10^{-6} T_c^{2,08} (v_a)^{1,11}, \quad (3)$$

где v_a – скорость сушильного воздуха, м/с.

При решении дифференциального уравнения в частных производных чаще всего применяется метод конечных разностей (МКР) [5]. Сущность МКР заключается в том, что производится разбиение области интегрирования. Затем для каждой отдельной области вместо дифференциальных уравнений выполняется замена их конечно-разностными аналогами. Таким способом получают систему линейных алгебраических уравнений для определения локальных значений температуры и влажности в каждом узле сетки. Конечно-разностное решение для разработанной системы уравнений (материального (см. формулу (1)) и теплового (см. формулу (2))) выполняется на однородной сетке с количеством разбиений по длине камеры сушилки i и по времени j . Сетка для расчетной области $[0 \leq x \leq L, 0 \leq t \leq T]$ имеет постоянный шаг как по пространственной координате $\Delta x = L/N$, так и по времени $\Delta t = T/M$ (рис. 2).

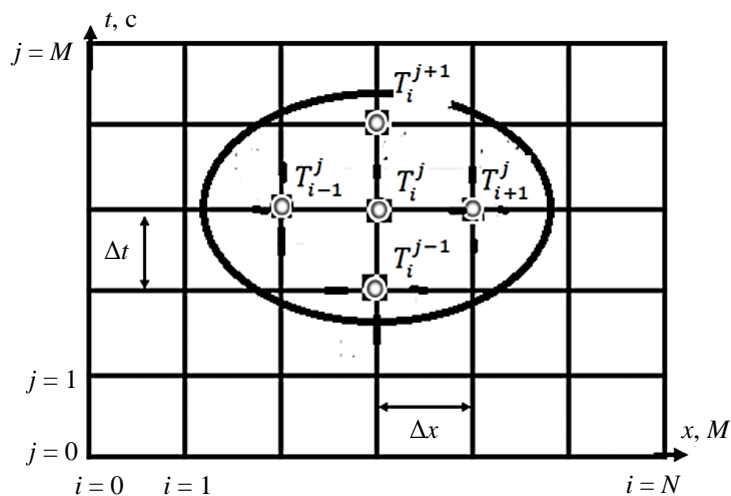


Рис. 2. Сетка для расчетной области

Для нахождения температуры листьев зеленого чая в процессе сушки в моменте времени $(j + 1)$ необходимо иметь решение в моменте j . Производные от функций $T(x, t)$ и $M(x, t)$ по времени и длине слоя зеленого чая в приведенном выше дифференциальном уравнении теплопроводности представляются конечно-разностным методом следующим образом:

$$\left(\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial t}\right)_i \approx \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t}; \quad (4)$$

$$\left(\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x}\right)_j \approx \frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{T_{i+1}^j - T_i^j}{\Delta x}; \quad (5)$$

$$\left(\frac{\partial M(x, \tau)}{\partial t}\right)_j \approx \frac{\Delta M}{\Delta t} = \frac{M_i^{j+1} - M_i^j}{\Delta t}; \quad (6)$$

$$\left(\frac{\partial M(x, \tau)}{\partial x}\right)_i \approx \frac{\Delta M}{\Delta x} = \frac{M_{i+1}^j - M_i^j}{\Delta x}. \quad (7)$$

Поставим выражения (4)–(7) в уравнения (1)–(2) и проведем преобразование полученных формул. В результате получим основную систему конечно-разностных уравнений для прогнозирования изменений температуры и влажности чайных листьев в течение процесса:

$$\begin{cases} \frac{M_i^{j+1} - M_i^j}{\Delta t} = -v_s \frac{M_{i+1}^j - M_i^j}{\Delta x} - K(M_i^j - M_e); \\ \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} = -v_s \frac{T_{i+1}^j - T_i^j}{\Delta x} - \frac{K(M_i^j - M_e)}{C_{ps} + C_{pw}M} (C_{pv}(T_c - T_i^j) + \lambda + C_{pw}T_i^j) + \frac{h(T_c - T_i^j)}{C_{ps} + C_{pw}M}. \end{cases} \quad (8)$$

Рассмотренный тип сушилки в работе – конвейерный, поэтому можно сказать, что значения температуры и влажности слоя зеленого чая в одной точке практически не изменяются, особенно при незначительном выбранном интервале по координате (Δx) . Систему дифференциальных уравнений для прогнозирования изменений качества продукта можно переписать в виде

$$\begin{cases} v_s \frac{M_{i+1} - M_i}{\Delta x} = -K(M_i - M_e); \\ v_s \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta x} = -\frac{K(M_i - M_e)}{C_{ps} + C_{pw}M} (C_{pv}(T_c - T_i) + \lambda + C_{pw}T_i) + \frac{h(T_c - T_i)}{C_{ps} + C_{pw}M}. \end{cases} \quad (9)$$

Из решения данной системы уравнений получим выражения для прогнозирования изменений температуры и влажности в сушилке:

$$\begin{cases} M_{i+1} = M_i + \frac{f_1(M_i, T_i)\Delta x}{v_s}; \\ T_{i+1} = T_i + \frac{f_2(M_i, T_i)\Delta x}{v_s}, \end{cases} \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} f_1(M_i, T_i) &= -K(M_i - M_e(M_i, T_i)); \\ f_2(M_i, T_i) &= -\frac{K(M_i - M_e)}{C_{ps} + C_{pw}M} (C_{pv}(T_c - T_i) + \lambda + C_{pw}T_i) + \\ &\quad + \frac{h(T_c - T_i)}{C_{ps} + C_{pw}M}. \end{aligned}$$

Основные теплофизические характеристики зеленого чая представлены в табл. 1.

Таблица 1. Тепловые параметры процесса сушки зеленого чая

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы
Удельная теплоемкость жидкой воды	C_{pw}	4 220	Дж/(кг·°С)
Удельная теплоемкость водяного пара	C_{pv}	2 200	Дж/(кг·°С)
Коэффициент теплопередачи	h	181	Вт/(м ² ·°С)
Скрытая теплота испарения воды	λ	2 300	Дж
Температура окружающей среды	T_0	20...25	°С
Начальная влажность	M_0	60...70	%

В уравнениях (1) и (2) имеется равновесное содержание влаги (M_e) зеленого чая, которое является неизвестной характеристикой. Для определения данного параметра была проведена серия из пятнадцати экспериментов по изучению влияния основных рабочих параметров на равновесную влажность чайного листа. В табл. 2 приведены экспериментальные данные M_e , полученные путем варьирования значений относительной влажности (M) и температуры (T) на пяти и трех уровнях соответственно. Повторные анализы образцов для определения равновесного содержания влаги привели к низким значениям среднеквадратического отклонения (СКО), что подтверждает надежность экспериментальной методики. Вся экспериментальная процедура повторялась дважды в идентичных рабочих условиях для проверки ее достоверности (значение СКО).

Таблица 2. Данные экспериментов по определению равновесной влажности зеленого чая

Относительная влажность, %	Температура, °С	Равновесная влажность, %	СКО, %
11	30	4,03	0,02
32	30	7,75	0,05
43	30	6,9	0,0
51	30	8,65	0,15
75	30	14,65	0,25
11	40	3,58	0,015
32	40	5,72	0,08
43	40	6,19	0,04
51	40	9,28	0,22
75	40	14,68	0,03
11	50	2,82	0,16
32	50	4,71	0,30
43	50	5,35	0,20
51	50	6,86	0,30
75	50	13,40	0,28

Результаты экспериментов (рис. 3, 4, см. табл. 2) показывают значительное влияние как температуры, так и относительной влажности на равновесную влажность.

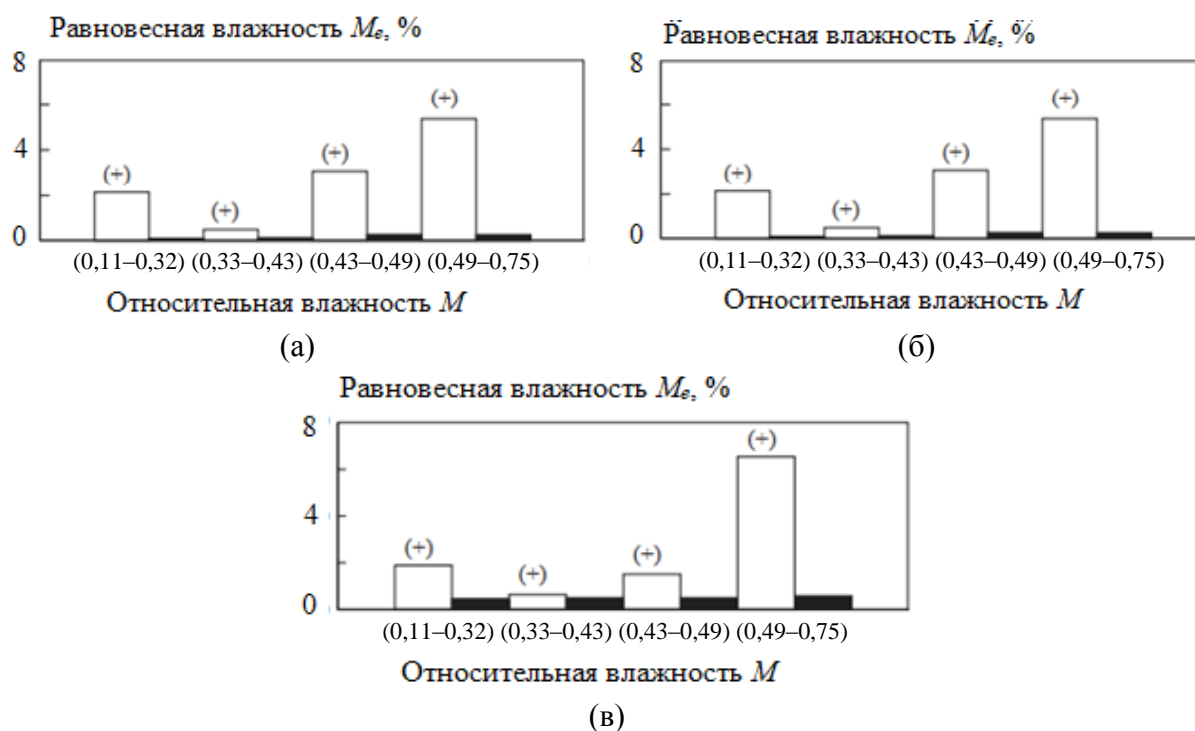


Рис. 3. Положительное влияние относительной влажности на равновесную при различных температурах: $T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (а); $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (б); $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в); темная полоса – ошибка в расчете эффекта

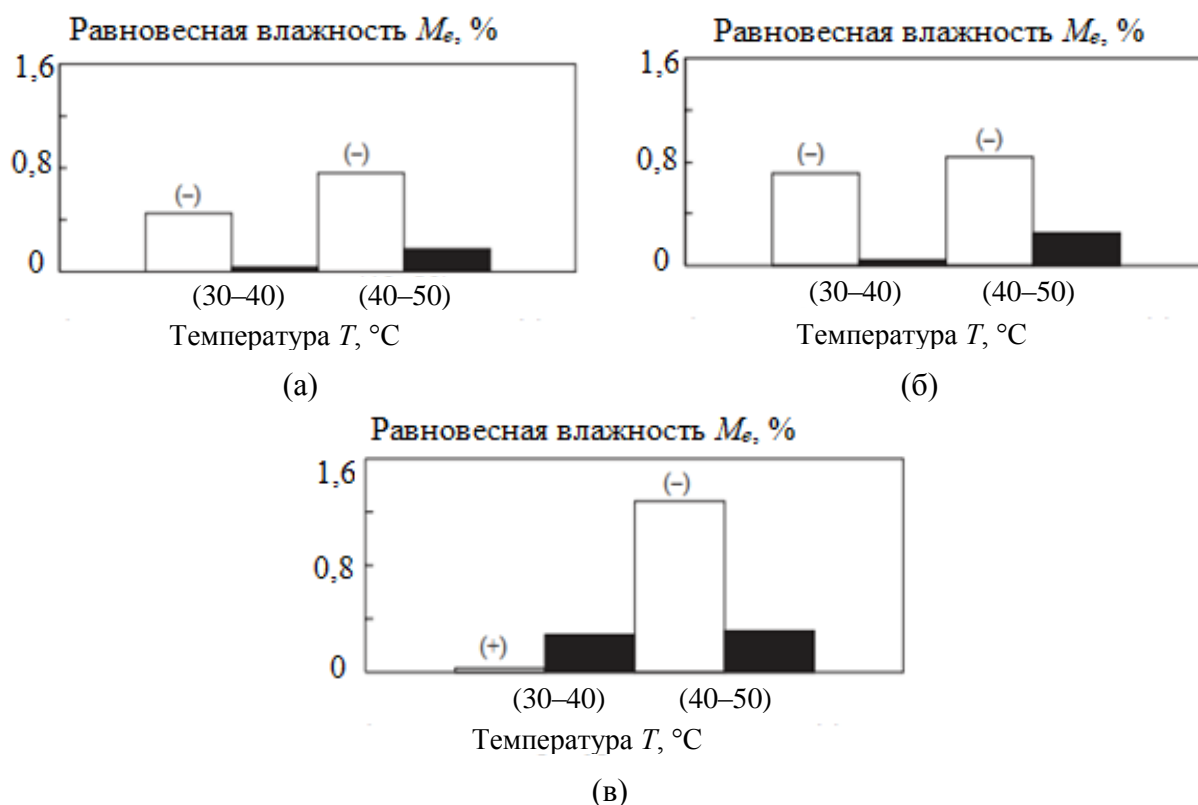


Рис. 4. Влияние температуры на равновесное влагосодержание при различной относительной влажности; (+) – положительное влияние, (-) – отрицательное: $M = 0,11$ (а); $M = 0,43$ (б); $M = 0,75$ (в); темная полоса – ошибка в расчете эффекта

При сравнении данных можно сделать следующие выводы:
во-первых, относительная влажность оказывает большее влияние на равновесную влажность, чем температура;

во-вторых, относительная влажность оказывает положительное влияние на равновесную влажность, т.е. тем большее M , чем большее M_e , а температура – отрицательное влияние.

На рис. 5 представлены графики изотерм равновесной влажности при двух различных температурах, исследованных в этой работе. Экспериментальные результаты подтверждают положительное значимое влияние относительной влажности на значения равновесной влажности, однако из этих результатов следует, что разница между значениями равновесной влажности на рис. 5 слева незначительна, поэтому влияние температуры на M_e требует более детального анализа путем увеличения диапазона температуры. Влияние температуры на результаты равновесной влажности заметно при увеличении разницы температуры исследования более чем на 40 °С. На рис. 5 справа показаны расчетные профили влагосодержания в диапазоне относительной влажности от 0 до 80 % при 10, 50 и 90 °С.

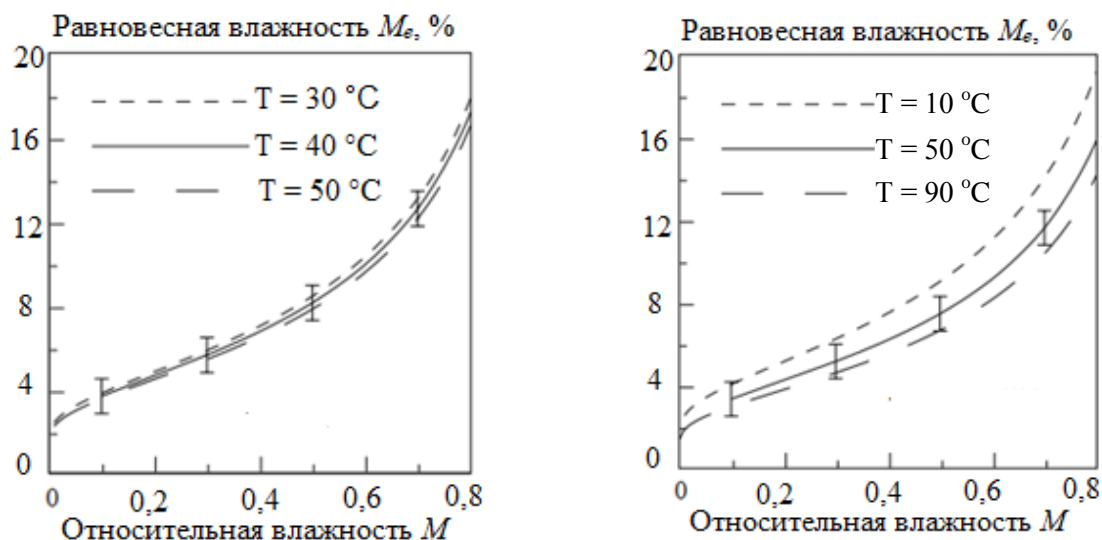


Рис. 5. Графики изотерм равновесной влажности при различных температурах

Для аппроксимации зависимости равновесной влажности листьев зеленого чая от относительной влажности и температуры слоя чая в данной работе использовали нечеткую логику. Чтобы решить эту задачу, необходимо определить нечеткие функции принадлежности и базу правил нечеткой продукции.

Входными переменными являются относительная влажность M и температура T слоя чая (рис. 6). Относительная влажность слоя чая по экспериментальным исследованиям принимает значения от 0 до 80 %. Температура находится в диапазоне 10...90 °С. Выходной величиной является равновесная влажность M_e , которая (по данным экспериментов) принимает значения от 3,58 до 18,6 %.

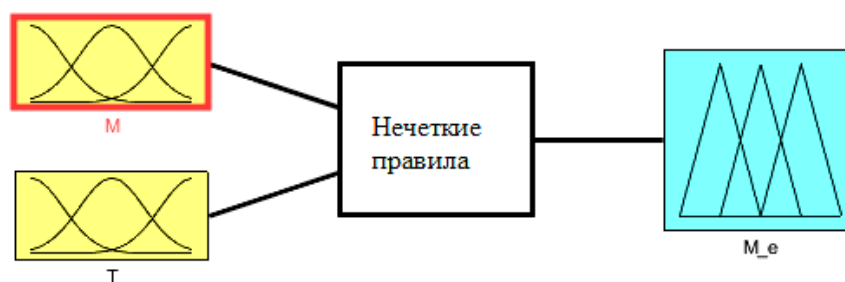


Рис. 6. Входные и выходные переменные блока нечеткой логики

На универсуме нечетких множеств в данном случае будет целесообразно принять пять значений входных и выходных лингвистических переменных. Термножества значений лингвистических переменных изображаются треугольными фигурами, а на границах области определения – сигмоидальными нечеткими интервалами. Для терм-наборов «Мин» и «Макс» переменных приняты трапециевидные формы по причине увеличенного диапазона значений в этой области. Графически лингвистические переменные показаны на рис. 7. Для обозначений термов всех переменных используются следующие слова и их определения: «Минимальная» – Min; «Малая» – M; «Средняя» – Cp; «Большая» – B; «Максимальная» – Max. Таким образом, лингвистические переменные имеют следующие значения: «Температура T » {Min, M, Cp, B, Max}; «Относительная влажность M » {Min, M, Cp, B, Max}; «Равновесная влажность M_e » {Min, M, Cp, B, Max}.

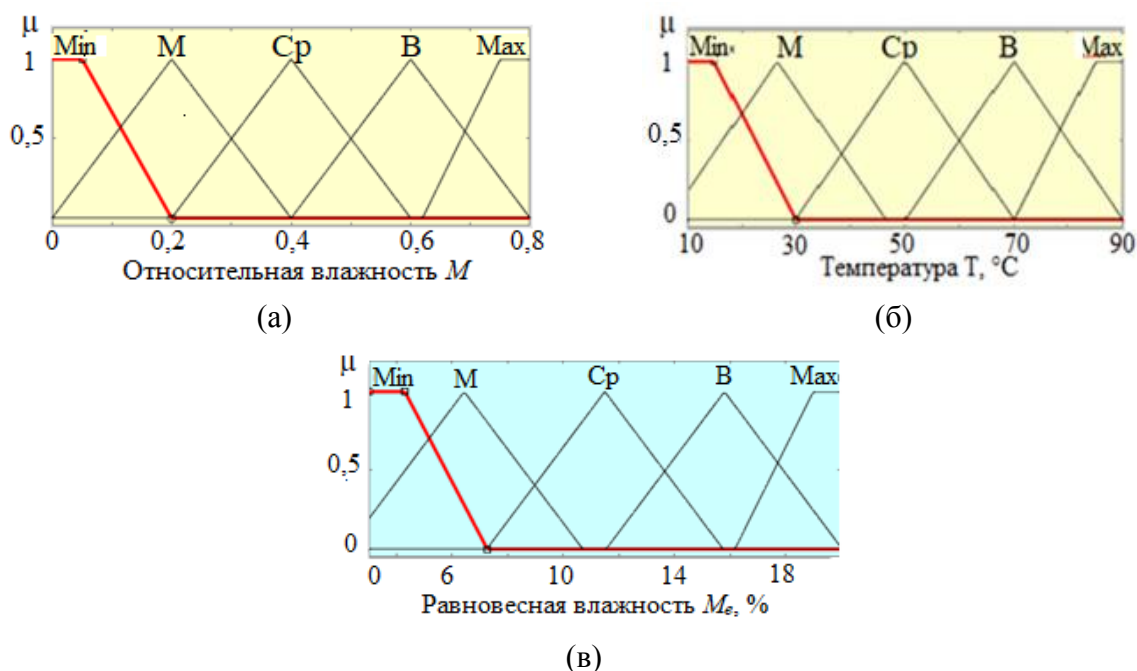


Рис. 7. Функции принадлежности переменных нечеткой логики: относительной влажности (а); температуры (б); равновесной влажности (в)

Для нечеткого вывода функции принадлежности воспользуемся одним из самых распространенных методов – методом Мамдани [6, 7]. В этом случае влияние комбинаций входных воздействий на выходной параметр записывается в следующем виде: если $T = \text{«Мин»}$ и $M = \text{«Мин»}$, то $M_e = \text{«Мин»}$.

С учетом специфики явления формализована база правил нечеткого вывода функции (табл. 3).

Таблица 3. База правил нечеткого вывода функции для равновесной влажности чая

Температура	Относительная влажность				
	Мин	М	Ср	В	Мах
Мин	Мин	Мин	М	В	В
М	Мин	М	М	В	В
Ср	Мин	М	Ср	В	В
В	Мин	М	Ср	В	В
Мах	Мин	М	Ср	В	Мах

Для формирования дефазифицированного значения выходной переменной используется метод преобразования по среднему центру. Четкое значение равновесной влажности рассчитывается по формуле

$$\overline{M_e} = \frac{\sum_{k=1}^N \mu_k \cdot M_e^k}{\sum_{k=1}^N \mu_k} \quad (11)$$

Аппроксимация зависимости равновесной влажности листьев зеленого чая от относительной влажности и температуры слоя чая реализована в приложении Fuzzy Logic Toolbox среды Matlab (рис. 8) [8].

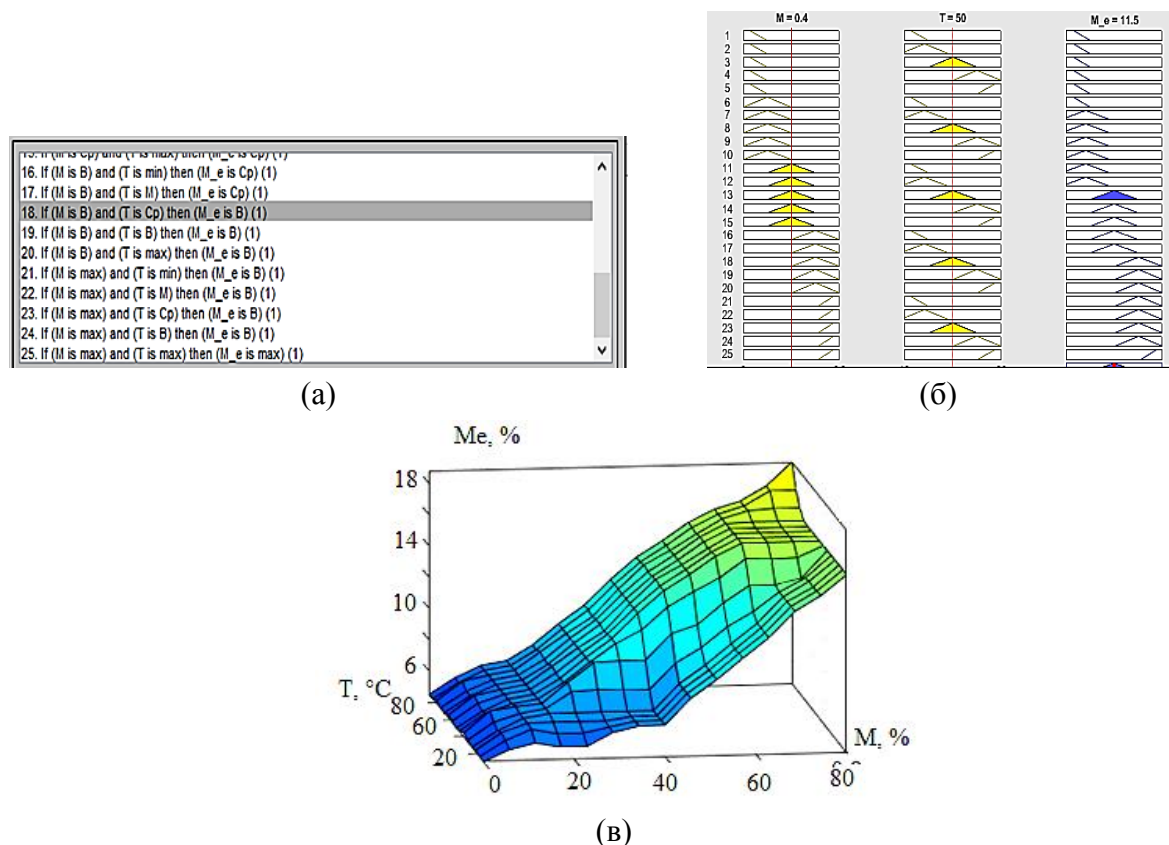


Рис. 8. Нечеткий вывод функций $M_e = f(T, M)$ в приложении Fuzzy Logic Toolbox среды Matlab: база правил нечеткого вывода (а); процедура нечеткого вывода и приведения к четкости (б); функция нечеткого вывода M_e (в)

Подставляя аппроксимации зависимости равновесной влажности листьев зеленого чая от относительной влажности и температуры слоя, а также основные параметры процесса термообработки (см. табл. 1) в общую модель сушки зеленого чая, можно провести численный расчет технологического процесса для его моделирования в среде Matlab.

Из приведенного выше решения дифференциальных уравнений в частных производных с помощью МКР и нечеткой аппроксимации зависимости равновесной влажности листьев зеленого чая от относительной влажности и температуры слоя чая можно описывать блок-схему алгоритма программы для вычисления параметров термообработки слоя зеленого чая.

РЕЗУЛЬТАТ ПРОЦЕССА МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Для проверки адекватности полученных математических моделей было проведено экспериментальное исследование процесса сушки зеленого чая в конвейерной сушилке (рис. 9).

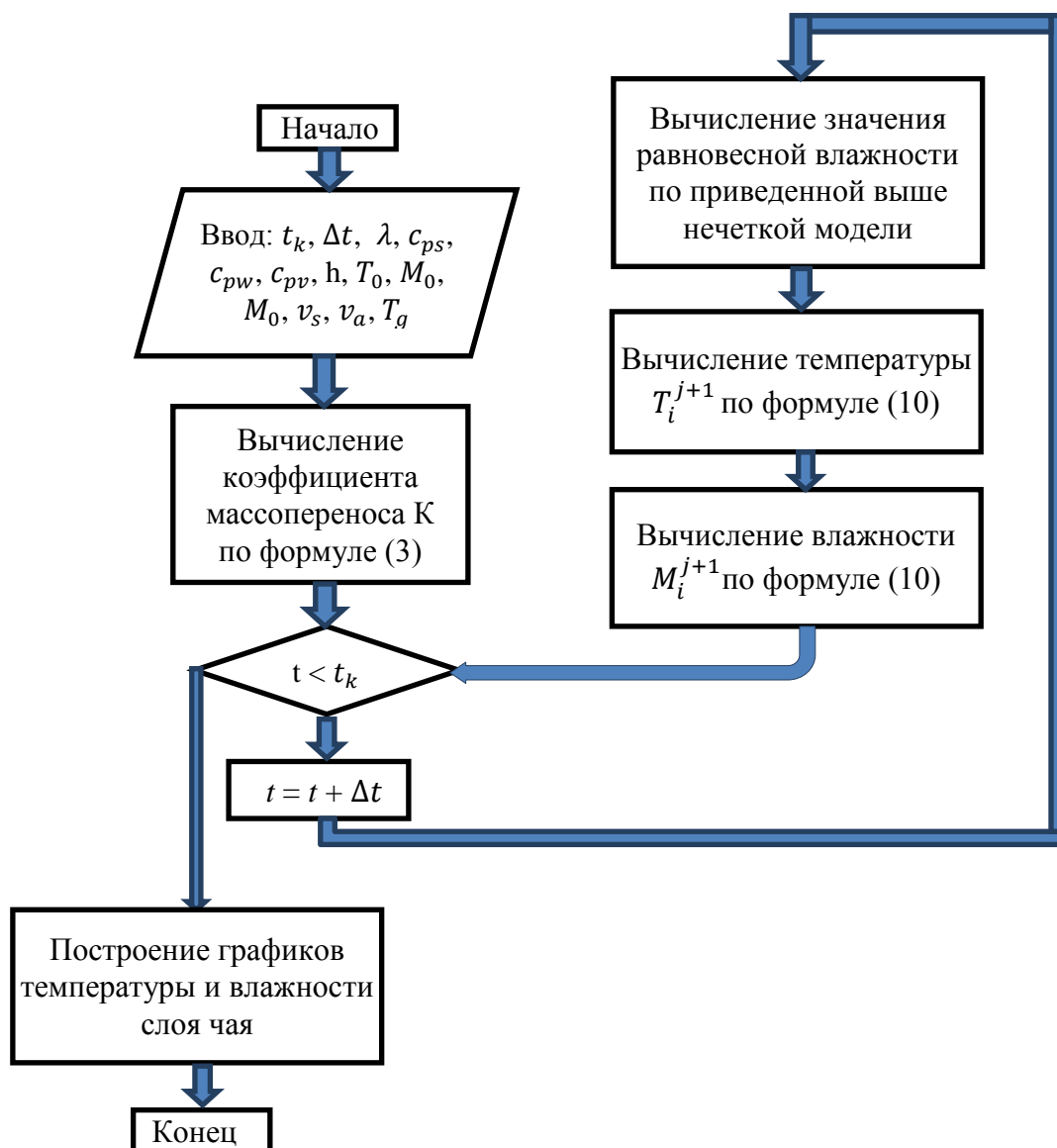


Рис. 9. Алгоритм моделирования процесса сушки зеленого чая

Графики экспериментального исследования процесса сушки использованы для оценки влияния температуры воздуха на влажность и температуру слоя зеленого чая, а также для оценки минимального времени сушки, необходимого для достижения заданных уровней влажности. Для этого были получены кривые зависимости температуры от времени в периодическом режиме (рис. 10) при заданной скорости конвейера $v_c = 0$ м/с. Скорость воздуха, которая была рассчитана на основе площади поперечного сечения конвейерной ленты, была установлена равной 2,0 м/с, а температура воздуха на входе составляла 70, 80 и 100 °С. Температура слоя зеленого чая во время сушки является ключевым фактором для сохранения биоактивных соединений, поэтому необходимо определить эту переменную для создания адекватных условий сушки. Таким образом, температура зеленого чая на небольшом участке конвейерной ленты измерялась с помощью инфракрасного термометра (Uni-trend UT300A, точность $\pm 2\%$) по мере прохождения чая через камеру. Выходную влажность образцов измеряли гравиметрическим методом с использованием цифровых весов (ГЕНАКА, ВГ440; 0–400 г; точность $\pm 10^{-4}$ кг).

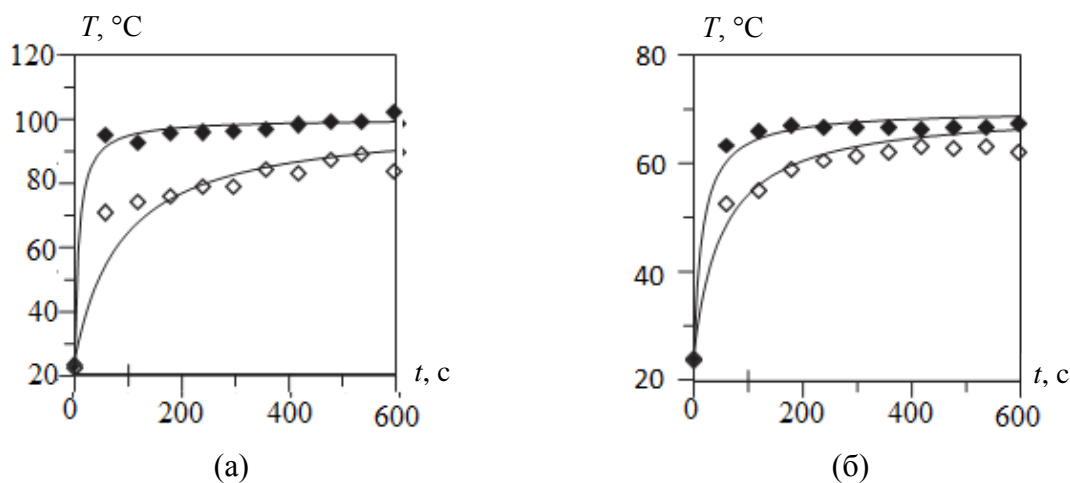


Рис. 10. Результаты сушки при 70 (а) и 100 °С (б).

Экспериментальные (символы) и расчетные (линии) температуры по модели при начальном значении влажности чая (M_0):
 $M_0 = 1,65$ (черные символы); $M_0 = 1,2$ (белые)

Графики на рис. 10 показывают, что математическая модель (уравнений (1) и (2)) предсказывает достаточно точно значения расчетных и экспериментальных данных температуры поверхности листьев чая во время сушки. При этом погрешность составляет не более 5 %.

Чтобы измерить изменения массы образцов, в процессе сушки на ленту помещали перфорированный лоток. Его можно было легко снять для взвешивания, и это помогло сократить количество допускаемых экспериментальных ошибок. Массу образцов постоянно измеряли с помощью цифровых весов. По массе образцов, измеренной в ходе эксперимента, и исходной массе можно установить количество испарившейся влаги. Результат экспериментов при изучении изменения влажности материала во время сушки показан на рис. 11. На нем представлено относительное отклонение между расчетной (по модели) и экспериментальной влажностями поверхности чайных листьев в диапазоне начального содержания влаги приблизительно 1,2–1,65 кг/кг и температуры воздуха 80–110 °С. В период сушки эта разница не превышает примерно 8 %, особенно на начальных стадиях. Таким образом,

средняя разница между рассчитанными по уравнению (1) значениями влажности поверхности и экспериментальными составляет примерно $5,1 \pm 2,7$ %.

На основе сравнения расчетных кривых и экспериментальных данных сушки зеленого чая в конвейерной сушилке (рис. 10, 11) можно сделать вывод об их удовлетворительной сходимости. Полученные модели рекомендуются для практического применения.

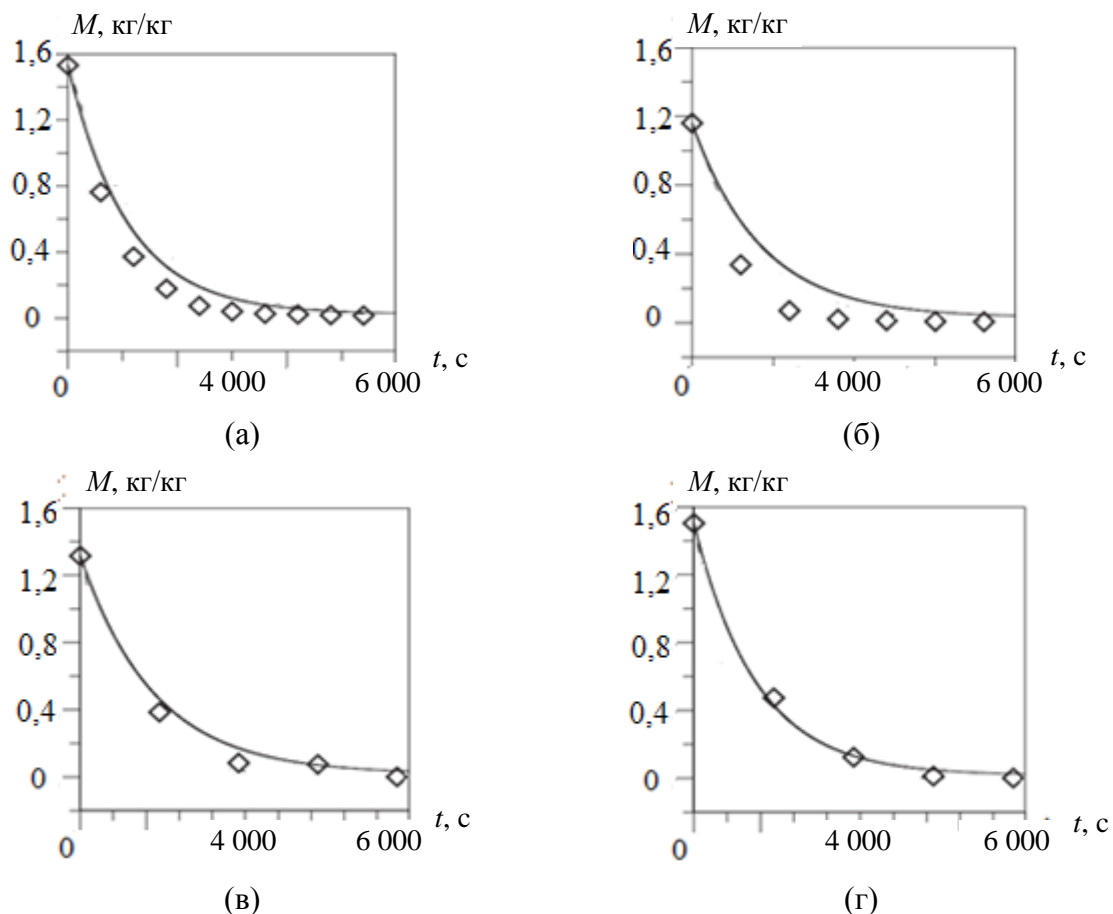


Рис. 11. Экспериментальное (символы) и расчетное (линии) содержание влаги в листьях чая по модели при 70 (а), 80 (б), 100 (в) и 110 °С (г)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подведем итоги. В результате исследования:

1. Разработаны математические модели для решения задач распределения влажности и температуры в слоях зеленого чая в процессе сушки.

2. На основе решения дифференциальных уравнений получены функциональные зависимости изменения влажности и температуры зеленого чая (с учетом нечеткой математической модели изменения равновесной влажности зеленого чая).

При имитационном моделировании отмечена хорошая сходимость результатов с экспериментальными данными, что доказывает высокую адекватность разработанной математической модели.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-07-00914.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cooper R., Morré D.J., Morré D.M. Medicinal benefits of green tea: Part I. Review of noncancer health benefits // *The Journal of Alternative and Complementary Medicine*. 2005. V. 11. № 3. P. 521–528.
2. Roshanak S., Rahimmalek M., Goli S.A.H. Evaluation of seven different drying treatments in respect to total flavonoid, phenolic, vitamin C content, chlorophyll, antioxidant activity and color of green tea (*Camellia sinensis* or *C. assamica*) leaves // *Journal of Food Science and Technology*. 2016. V. 53. P. 721–729.
3. Вавилова О.И. Моделирование сушки черного чая в тонком слое в зависимости от температуры и скорости движения воздуха (Индия. ФРГ) // *Пищевая и перерабатывающая промышленность. Реферативный журнал*. 2005. № 2. С. 691.
4. Kamke F., Wilson J. Computer simulation of a rotary dryer. Part I: Retention time // *AIChE Journal*. 1986. V. 32. № 2. P. 263–268.
5. Вержбицкий В.М. Основы численных методов. М.: Высшая школа. 2002. 840 с.
6. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург. 2005. 736 с.
7. Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети: учебное пособие. М.: Физматлит. 2001. 224 с.
8. MATLAB Release Notes for R2008a. MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/release-notes.html> (дата обращения: 15.02.2023).

Для цитирования: Фам К.Б., Мурашев П.М., Богатилов В.Н. Моделирование процесса сушки зеленого чая // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2023. № 3 (19). С. 71–83.

MODELING OF GREEN TEA DRYING PROCESS

K.B. FAM, Postgraduate, P.M. MURASHEV, Postgraduate,
V.N. BOGATIKOV, Dr. Sc.

Tver State Technical University
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, Russian Federation,
e-mail: phambang79520897405@gmail.com

The paper describes the design and simulation using MatLab and Simulink process of drying green tea in a conveyor belt dryer with fuzzy approximation of the dependence of the equilibrium moisture content of tea on its relative humidity and temperature. On the basis of comparison of calculated curves for the developed model, as well as on the basis of available experimental data on drying of green tea in a conveyor dryer the conclusion about their satisfactory convergence was made. The obtained models are recommended for practical application.

Keywords: green tea drying, fuzzy set theory, drying mathematical model, equilibrium moisture, green tea moisture.

Поступила в редакцию/received: 03.03.2023; после рецензирования/revised: 24.03.2023;
принята/accepted: 03.04.2023