

8. Яконовская Т.Б. К вопросу о качестве геологической информации в торфяной сфере хозяйственной деятельности // *Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: Сборник трудов 17-й Международной конференции по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики*. Тула: ТулГУ. 2021. С. 488–492.

9. Яконовская Т.Б., Жигульская А.И., Яконовский П.А. Оценка использования геофизического метода VLF для определения мощности торфяного месторождения // *Горные науки и технологии*. 2020. Т. 5. № 3. С. 224–234.

10. Филиппов В.А., Филиппов Д.А. О методике построения стратиграфических колонок торфяных залежей с использованием программы Gistogram Maker // *Труды Инсторфа*. 2010. № 2 (55). С. 11–14.

**Для цитирования:** Яконовская Т.Б. Использование доступных информационных инструментов в геологическом анализе // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 4 (16). С. 54–63.

## USE OF AVAILABLE INFORMATION TOOLS IN GEOLOGICAL ANALYSIS

T.B. YAKONOVSKAYA, Cand. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,  
Russian Federation, e-mail: tby81@yandex.ru

The article describes the experience of using Excel analytical tools to analyze the results of a geological survey of a peat deposit. A technique for forming a bank of geological data in MS Excel is given, and the result of constructing stratigraphic columns and profiles of a peat deposit using graphic tools and a VBA macro used in MS Excel is described.

*Keywords:* peat deposit, geological analysis, stratigraphic column, profile, graphic toolkit, diagram, VBA, MS Excel.

Поступила в редакцию/received: 03.07.2022; после рецензирования/ revised: 06.09.2022;  
принята/accepted: 12.09.2022

УДК 681.5.015.2

## ПРОГНОЗИРУЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ ИНДЕКСОМ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА СУШКИ ЗЕЛЕННОГО ЧАЯ

К.Б. ФАМ, аспирант, П.М. МУРАШЕВ, аспирант,  
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., Богатилов В.Н., 2022

В работе описаны проектирование, моделирование и реализация системы управления на основе прогнозного управления технологическими индексами температуры воздуха и скорости конвейерной ленты в камере сушки зеленого чая при нечетком взаимодействии между температурой поверхности слоя зеленого чая и его

влажностью. Моделирование автоматизированной системы управления проводилось с использованием MatLab и Simulink. Результаты численного моделирования показывают, что прогнозирующее управление на основе технологического индекса качества стабильно и надежно с точки зрения подавления входных помех. В сравнении с традиционным многоконтурным пропорционально-интегрально-дифференцирующим регулятором система управления на основе показателя качества технологии создает условия, которые приводят к значительному улучшению производительности, а также контроля над процессом сушки.

*Ключевые слова:* сушка зеленого чая, прогнозирующее управление, моделирование автоматизированной системы управления, конвейерная ленточная сушилка, технологический индекс качества.

**DOI:** 10.46573/2658-5030-2022-4-63-76

## **ВВЕДЕНИЕ**

Растениеводство и производство зеленого чая – важный вид экономической деятельности в Бразилии и Аргентине. Вместе эти страны производят около 500 тыс. тонн сухого зеленого чая в год, который продается более чем в 70 странах мира. Собирают листья зеленого чая с содержанием влаги около 70,5 % (влажная основа) и производят чай на большом количестве малых и средних предприятий, расположенных в вышеупомянутых государствах. Производственный процесс в основном включает стадию сушки в роторных или ленточных сушилках для получения обезвоженного продукта, который, как правило, используется для приготовления безалкогольных напитков. На этом этапе содержание влаги на выходе является неконтролируемым параметром, что имеет важные последствия для качества продукции и экономии энергии.

Управление процессом сушки – сложная задача ввиду наличия многих факторов, таких как нелинейность, неопределенность процесса и неточность математической модели. Исследования показывают, что способность прогнозировать переменные состояния системы в будущем периоде и определять на основе данного прогноза управляющие воздействия играет важную роль в качестве управления технологическим оборудованием. Следовательно, для повышения качества управления при неопределенности параметров функциональных компонентов необходимо применять методы проектирования, основанные на использовании регуляторов, прогнозирующих состояние технических параметров системы, и методы нечеткой логики для определения отклонения текущих значений качеств продукта от заданных.

Стратегии управления сушкой в сушилках с конвейерной лентой представлены в работе [1]. При этом температура сушки и/или скорость потока воздуха обычно являются управляемыми переменными. Для достижения высокой эффективности и точного реагирования на конечную влажность чайного листа необходимо не только регулировать температуру воздуха, но и осуществлять контроль скорости сушильного конвейера.

В настоящей работе предложена автоматизированная система управления на основе алгоритма прогнозирующего управления с учетом технологического индекса качества для управления температурой воздуха и скоростью конвейерной ленты в камере сушилки зеленого чая.

## **СТРАТЕГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СУШКИ ЗЕЛЕННОГО ЧАЯ**

К основным задачам управления сушкой относятся поддержание заданной температуры продукта при неопределенном возмущении и контроль движения конвейера с целью обеспечения правильного содержания влаги в чайных листьях,

предотвращения пересушивания (что увеличивает затраты энергии и может вызвать термическое повреждение) и стабилизации всего процесса.

Основными критериями оптимизации процесса сушки являются качество конечного продукта (конечная влажность зеленого чая), удельные энергозатраты (на единицу массы испаренной влаги) и время сушки. В процессе конвекционной сушки эти параметры зависят от температуры сушильной камеры и скорости сушильного конвейера. Таким образом, задача управления процессом сушки зеленого чая сводится к управлению нагревателем (чтобы слой чая быстро нагревался до заданной температуры, которая затем должна оставаться постоянной в течение всего процесса) и регулированию движения слоя зеленого чая в камере сушиллки.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Схематический вид конвейерно-ленточной сушилки для натуральных продуктов (овощей, фруктов, лечебных трав и др.) представлен на рис. 1. Сушиллка состоит из набора датчиков температуры и влажности и ленточного конвейера (1 × 5,4 м), который медленно перемещает мелкие частицы влажного слоя зеленого чая через поток сушильного агента. В качестве сушильного агента используется предварительно подогретый воздух с точно заданными характеристиками. Сушильный агент поступает по ленточному транспортеру и через зазоры снизу вверх, перпендикулярно направлению движения влажного материала.

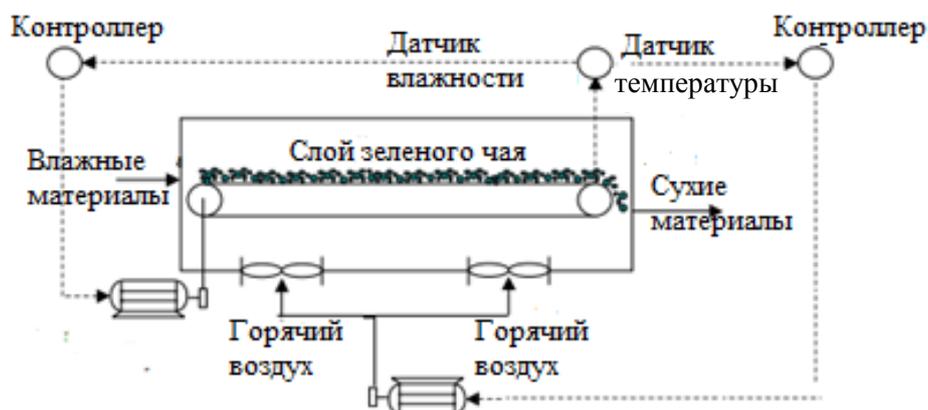


Рис. 1. Схема оцениваемой конвейерной сушилки

Для нагрева сушильного воздуха и скорости ленты используются регулируемые электронагреватели и конвейерные ролики (24 кВт). Листья зеленого чая распределяются на подносе тонким слоем (не более 30 мм). Воздух перекачивается в камеру сушки с постоянной скоростью 0,08...0,13 м/с и проверяется с помощью калиброванного анемометра с горячим проводом модели 405-V1.

Температуру внутри сушилки контролировали термопарой К-типа, чтобы подтвердить, что эксперименты по сушке проводились в изотермических условиях. Прямые показания температуры поверхности листьев были получены при использовании калиброванного инфракрасного термометра Scantemp 410 с температурным диапазоном от -33 до 500 °С и точностью  $\pm 2$  %. Массу испаряющейся влаги в процессе сушки определяли в автономном режиме путем периодического взвешивания подноса на цифровых весах (с разрешением  $\pm 10^{-7}$  кг), расположенных за пределами камеры [2].

Энергетический и массовый баланс воды в стационарном элементе объема твердой фазы на конвейере описываются нестационарными одномерными дифференциальными уравнениями в частных производных первого порядка, которые определяются как:

уравнение переноса энергии [3, 4]:

$$c\rho \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость сухих листьев зеленого чая;  $T(x, \tau)$  – температура слоя зеленого чая;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $x$  – осевое положение вдоль конвейерной сушилки;

начальные и граничные условия:

$$T(x, 0) = T_0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = 0; \quad (3)$$

$$\lambda \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial x} = k (T_c - T(r, \tau)), \quad (4)$$

где  $r$  – толщина слоя;  $T_c$  – температура сушильного агента;  $k$  – коэффициенты теплоотдачи.

Уравнение переноса массы:

$$\frac{\partial M}{\partial \tau} = -u_c \frac{\partial M}{\partial x} - K(M - M_e), \quad (5)$$

где  $u_c$  – скорость конвейерной ленты;  $x$  – осевое положение вдоль конвейерной ленты-сушилки;  $K$  – коэффициент массообмена;  $M_e$  – равновесная влажность листьев чая.

Коэффициент массообмена в уравнении (5) определяется по формуле [10]

$$K = 10^{-6} T_g^{2,08} \left( \frac{G_g}{p_g} \right)^{1,11} + (2,95 \cdot 10^{-5} T_g - 1,73 \cdot 10^{-3}) \exp \left[ (0,46 T_g - 61,15) \frac{G_g}{p_g} \right], \quad (6)$$

где  $G_g$  – массовая скорость сушильного воздуха;  $p_g$  – плотность воздуха.

Для получения передаточной функции процесса линейная модель системы строится путем линеаризации уравнений (1)–(4) при использовании разложения в ряд Тейлора и при нахождении преобразования Лапласа по методике из источника [5].

$$\frac{\partial^2 T(s, x)}{\partial x^2} = q \cdot T(s, x), \quad (7)$$

где  $q = s \cdot \frac{c\rho}{\lambda}$ .

Решение данного дифференциального уравнения (6):

$$T(s, x) = C_1 e^{\sqrt{q}x} + C_2 e^{-\sqrt{q}x}.$$

При начальном условии (3) мы получили  $C_1 = C_2 = C$ .

Для определения общей передаточной функции между входными и выходными переменными  $T(s, x)$  и  $T_g$  можно использовать метод матрицы передачи [6]. Общая матрица передачи  $A(s)$  характеризует динамическую связь между температурами воздуха  $T_g$  и тепловыми потоками:

$$\begin{bmatrix} T(s, x) \\ J(s, x) \end{bmatrix} = A(s) \cdot \begin{bmatrix} T_g(s, x) \\ J(s, 0) \end{bmatrix},$$

где  $A(s) = \begin{bmatrix} e^{-\sqrt{q} \cdot r} & e^{\sqrt{q} \cdot r} / (\lambda \cdot q) \\ -\lambda \cdot q \cdot e^{-\sqrt{q} \cdot r} & e^{-\sqrt{q} \cdot r} \end{bmatrix}$ .

Общая передаточная функция [6]:

$$W_1(s) = \frac{1}{1 + G_p(s)}; \quad (8)$$

$$G_{p1}(s) = \frac{\lambda}{k \cdot r} \cdot \frac{a_{11}(s)}{a_{12}(s)}. \quad (9)$$

Основные параметры (таблица) подставляются в формулы (8) и (9) для получения упрощенной передаточной функции процесса:

$$W_1(s) = \frac{400}{(450s + 1)(60s + 1)}. \quad (10)$$

Тепловые параметры процесса сушки зеленого чая

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы
Удельная теплоемкость	$c$	362	Дж / кг · К
Теплопроводность	$\lambda$	191,2	Вт / М · К
Плотность зеленого чая	$\rho$	750	кг/м <sup>3</sup>
Удельная пористость	$\varepsilon$	0,97	м <sup>2</sup> /г
Температура окружающей среды	$T_0$	298	К
Плотность воздуха	$p_g$	1 225	кг/м <sup>3</sup>

Для передаточной функции по влажности профиль влажности по Лапласу имеет вид

$$(s + K) \cdot M(s, x) + u_c \frac{\partial M(s, x)}{\partial x} = K \cdot M_e.$$

Решив данное дифференциальное уравнение, получим передаточную функцию вида

$$W_2(s) = \frac{-95,4}{(151,25s + 0,1153)(10s + 1)}. \quad (11)$$

Взаимодействие между температурой поверхности слоя зеленого чая и влажностью чайных листьев представляет собой сложное расчетное уравнение, поэтому для моделирования такого взаимодействия в работе было предложено использовать на основе полученных экспериментальных результатов и экспертных оценок построение нечеткой аппроксимирующей системы (рис. 2) [7]. При этом предполагалось, что повышение температуры уменьшает содержание влаги, а увеличение содержания влажности снижает температуру.

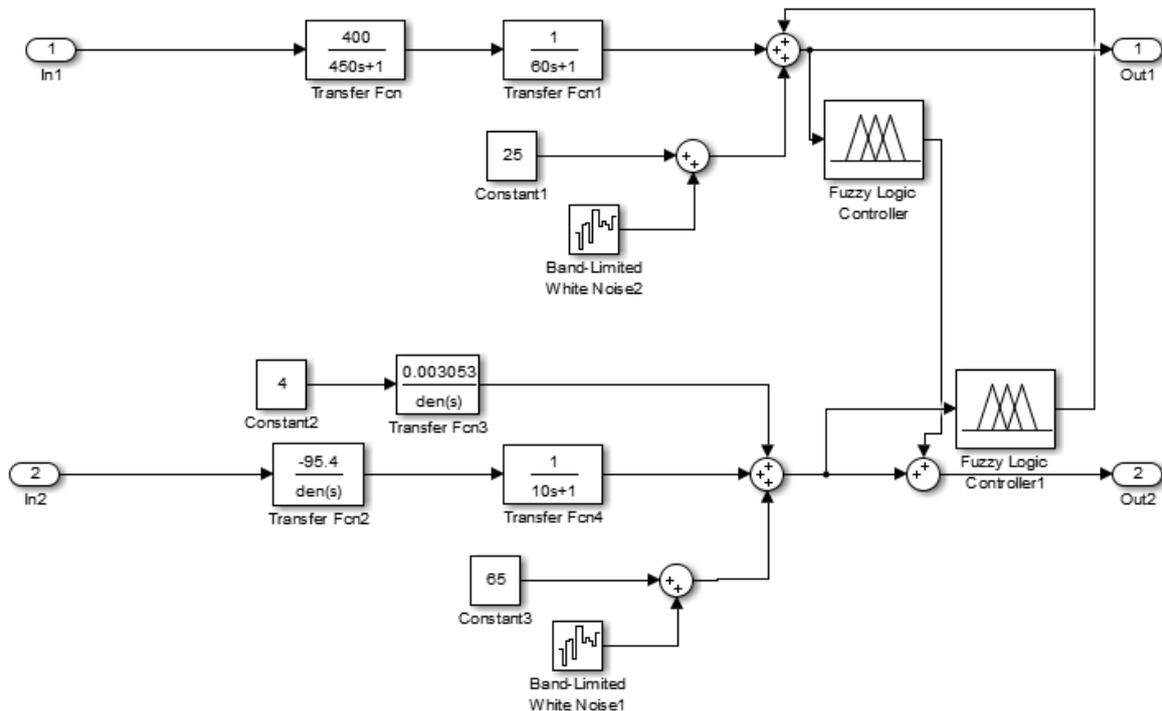


Рис. 2. Модель процесса сушки зеленого чая [7]

Общий вид окна с правилами влияния температуры поверхности слоя зеленого чая на влажность представлен на рис. 3; общий вид окна с правилами влияния влажности зеленого чая на температуру поверхности слоя показан на рис. 4.

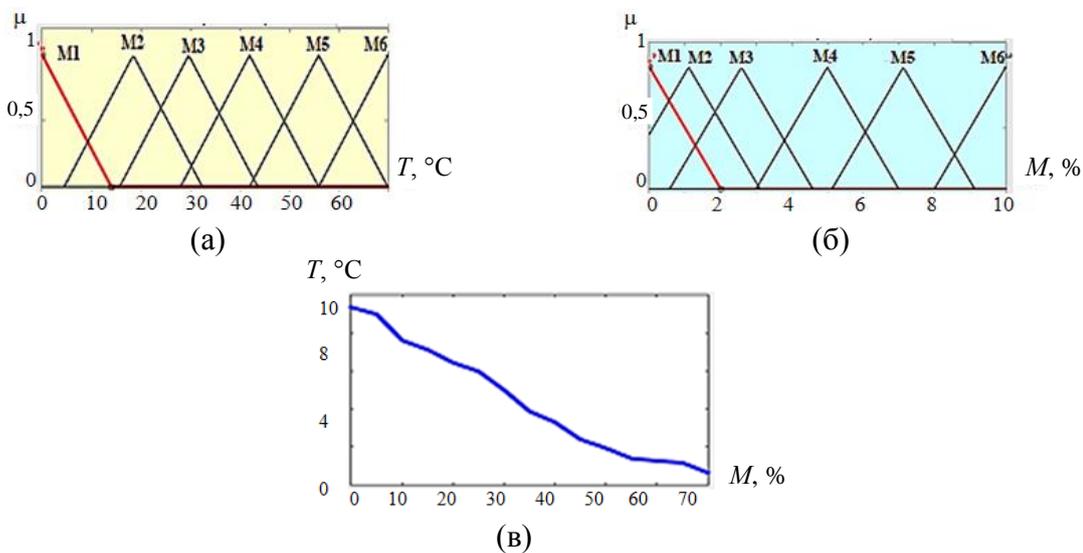


Рис. 3. Нечеткая логика и функции принадлежности влияния температуры поверхности слоя зеленого чая на влажность: функция принадлежности температуры (а); функция принадлежности влажности (б); нечеткая аппроксимация зависимости температуры от влажности (в)

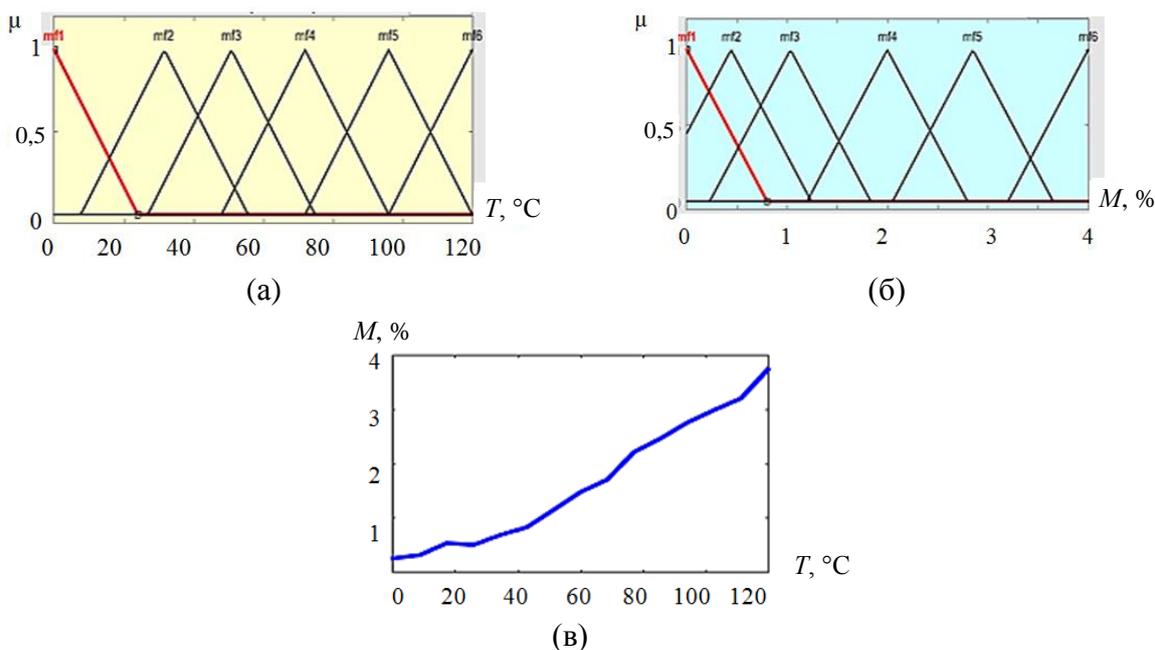


Рис. 4. Нечеткая логика и функции принадлежности влияния влажности на температуру поверхности слоя зеленого чая: функция принадлежности температуры (а); функция принадлежности влажности (б); нечеткая аппроксимация зависимости влажности от температуры (в)

Предлагаемая динамическая модель включает важные упрощения:

- 1) объемным элементом баланса массы и энергии является пористая среда, включающая жидкую и твердую фазы, представленные осушающей средой и смесью жидкой воды и сухого вещества;
- 2) перенос массы и тепла представляет собой комбинацию одновременных внутренних и внешних конечных сопротивлений;
- 3) не учитываются градиенты влажности и изменения свойств воздуха по слою ложа, что обычно принято при тонкослойной сушке;
- 4) исключается влияние усадки на скорость сушки.

Результат экспериментального исследования сушки зеленого чая представлен на рис. 5.

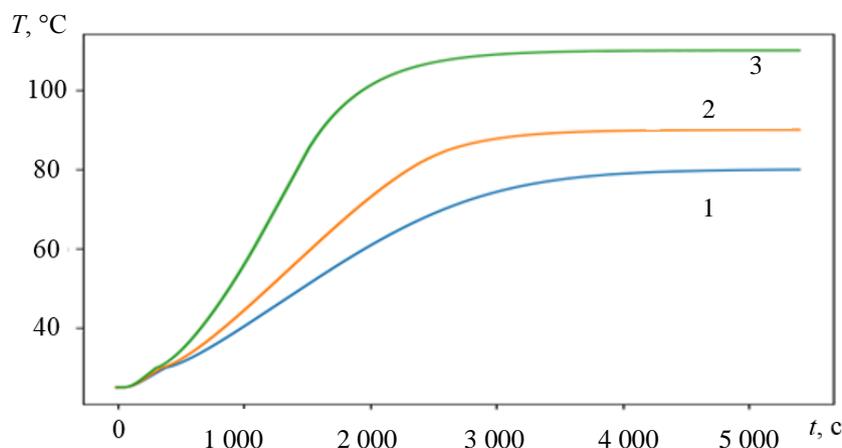


Рис. 5. Температурное поле в экспериментальном исследовании сушки зеленого чая при температуре воздуха: 1 – 80 °С; 2 – 90 °С; 3 – 110 °С

## РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

На сегодняшний день большинство контроллеров в управлении сушилки разработаны на основе классической теории управления. Например, применение пропорционально-интегрально-дифференцирующего регулирования широко распространено благодаря его простой структуре и реализации. Однако когда входной сигнал системы управления процессом сушки зеленого чая представляет собой только идеальные показатели температуры и влажности, выходная ошибка регулятора температуры и влажности относительно велика из-за временной задержки системы. Следовательно, контроллер, отслеживающий температуру и влажность слоя зеленого чая в сушилке, должен учитывать информацию не только об идеальных заданных значениях, но о будущих таких значениях. В настоящей работе предлагается архитектура управления с отслеживанием температуры и влажности на основе алгоритма прогнозирующего управления с учетом технологического индекса качества. Под технологическим индексом качества понимается степень нечеткого равенства между значением контролируемого параметра и желаемым значением [8].

Пусть  $X_p = \{X_1, X_2, \dots, X_p\}$  – множество параметров состояния процесса. Каждый параметр  $X_k$  описывается соответствующей лингвистической переменной  $\langle \beta_k, X_k, D_k \rangle$ . Нечеткую ситуацию параметра  $X_k$  можно выразить следующим образом:

$$\tilde{s}(X_k) = \{ \langle \mu_{\tilde{s}}(E^h)/E^h \rangle; h = 1 \dots n,$$

где  $n$  – количество термов данного параметра  $X$ .

Пусть  $\tilde{s}_i$  будет в качестве центра безопасности (ситуация технологического процесса имеет наиболее безопасный характер), а  $\tilde{s}_j$  – текущая ситуация (рис. 6).

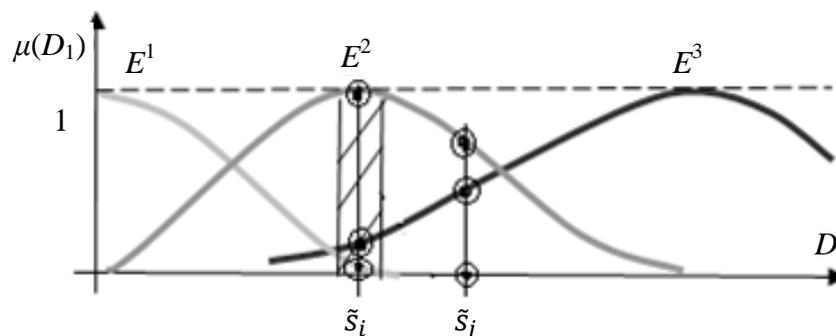


Рис. 6. Функции принадлежности лингвистической переменной  $\langle \beta_k, X_k, D_k \rangle$

Индекс технологического качества процесса предназначен для определения относительного расстояния между центром безопасности и текущим значением индекса. Он вычисляется по формуле

$$In(\tilde{s}_j) = v(\tilde{s}_j, \tilde{s}_i) \& v(\tilde{s}_i, \tilde{s}_j) = (v(\tilde{s}_j, \tilde{s}_i), v(\tilde{s}_i, \tilde{s}_j)),$$

где

$$\begin{aligned} v(\tilde{s}_j, \tilde{s}_i) &= \min\{\mu_{\tilde{s}_j}(E^1) \rightarrow \mu_{\tilde{s}_i}(E^1), \mu_{\tilde{s}_j}(E^2) \rightarrow \mu_{\tilde{s}_i}(E^2), \dots, \mu_{\tilde{s}_j}(E^n) \rightarrow \mu_{\tilde{s}_i}(E^n)\} \\ (\mu_{\tilde{s}_j}(E^h) \rightarrow \mu_{\tilde{s}_i}(E^h)) &= \max\{1 - \mu_{\tilde{s}_j}(E^h), \mu_{\tilde{s}_i}(E^h)\}, h = 1 \dots n; \\ v(\tilde{s}_i, \tilde{s}_j) &= \min(\mu_{\tilde{s}_i}(E^1) \rightarrow \mu_{\tilde{s}_j}(E^1), \mu_{\tilde{s}_i}(E^2) \rightarrow \mu_{\tilde{s}_j}(E^2), \dots, \mu_{\tilde{s}_i}(E^n) \rightarrow \mu_{\tilde{s}_j}(E^n)) \\ (\mu_{\tilde{s}_i}(E^h) \rightarrow \mu_{\tilde{s}_j}(E^h)) &= \max\{1 - \mu_{\tilde{s}_i}(E^h), \mu_{\tilde{s}_j}(E^h)\}, h = 1 \dots n. \end{aligned}$$

В настоящей работе нам нужно определить индексы двух основных технологических параметров процесса: температуры и влажности поверхности слоя зеленого чая. Для установления данных индексов используются блоки вычисления в MatLab (рис. 7).

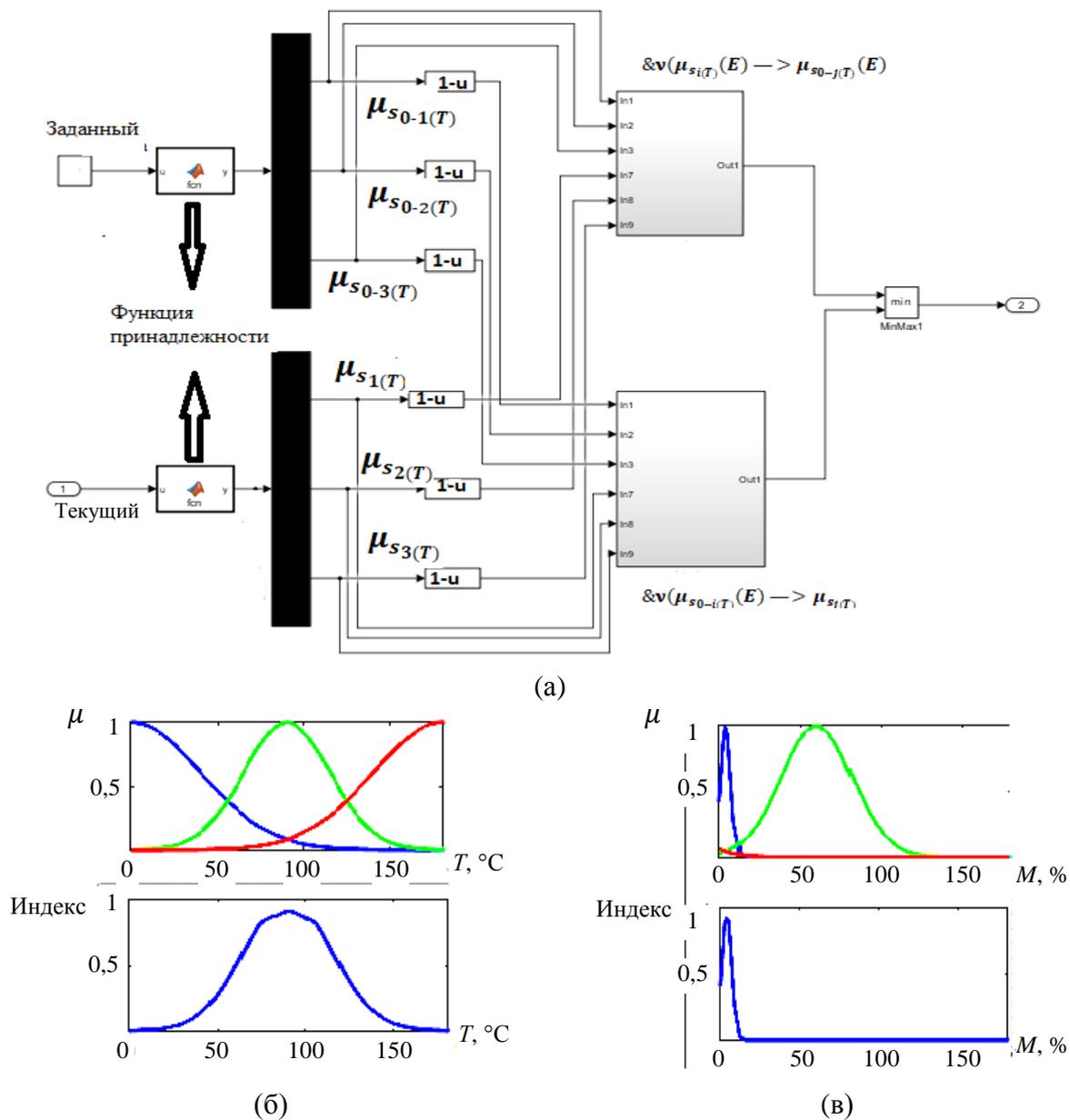


Рис. 7. Блок вычисления технологического индекса качества: блок формирования индекса (а) и результат процесса формирования по температуре (б); влажности (в)

В блоке регулятора используется алгоритм управления прогнозирующими контроллерами с учетом технологического индекса качества (рис. 8).

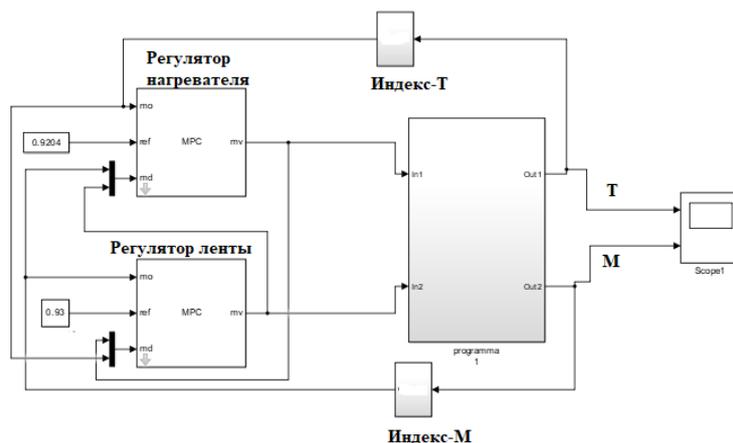


Рис. 8. Блок-схема регулятора обратной связи

### КОНСТРУКЦИЯ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ

Основная идея управления с прогнозирующей моделью (УПМ) состоит в том, чтобы предсказать поведение системы и получить ее локально-оптимальное решение. Блок-схема системы УПМ показана на рис. 9. Результатом решения является определение набора управляющих сигналов, соответствующего предсказанным переменным состояниям системы в будущем временном периоде.

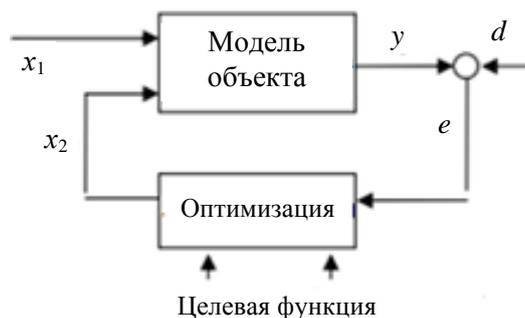


Рис. 9. Блок-схема системы УПМ:

$x_1$  и  $x_2$  – прошлые и прогнозируемые входные данные соответственно;  
 $y$  – выходной прогнозирующий управляющий сигнал;  
 $d$  – желаемый выходной сигнал

Алгоритм системы прогнозирующего управления:

- шаг 1: определить входные параметры объекта управления и ограничить область прогноза;
- шаг 2: задать начальный набор значений;
- шаг 3: построить и рассчитать модель прогнозирующего управления общего вида;
- шаг 4: минимизировать целевую функцию  $J$ ;
- шаг 5: определить матрицу приращений управляющего сигнала  $\Delta u$ ;
- шаг 6: выбрать первую составляющую  $\Delta u(k|k)$  матрицы приращений управляющего сигнала  $\Delta u$ ;
- шаг 7: найти следующий закон управления процессом, который представляет собой сумму  $\Delta u(k|k)$  и  $u(k-1)$ .

Модель управления в пространстве состояний системы выводит уравнения, которые предсказывают модель в пространстве состояний [9]:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t); \\ y(t) = Cx(t), \end{cases} \quad (12)$$

где  $x(t)$  – переменная состояния системы;  $u(t)$  – управляющая входная переменная;  $y(t)$  – выходная переменная системы;  $A, B, C$  – матрицы коэффициентов

Из формулы (12) получим

$$\begin{cases} \Delta x(k+1) = A\Delta x(k) + B\Delta u(k); \\ y(k) = C\Delta x(k) + y(k-1), \end{cases}$$

где

$$\begin{cases} \Delta x(k) = x(k) - x(k-1); \\ \Delta u(k) = u(k) - u(k-1). \end{cases}$$

В системе управления предсказывается  $p$  шагов вперед, временная область управления контроллера равна  $c$  и  $p > c$ . Если значение  $p$  относительно мало, переменное состояние может не отреагировать на внезапные изменения опорного входа. Если значение  $p$  относительно велико, реакция системы на возмущения замедляется. В данной статье количество прогнозируемых шагов принимается равным 10, а количество шагов управления – 2. Система прогнозирует инкрементное значение  $p$  шагов в момент времени  $k$  следующим образом:

$$\begin{cases} \Delta x(k+1|k) = A\Delta x(k) + B\Delta u(k); \\ \Delta x(k+2|k) = A\Delta x(k+1) + B\Delta u(k+1) = A^2\Delta x(k) + AB\Delta u(k) + B\Delta u(k+1); \\ \Delta x(k+3|k) = A^3\Delta x(k) + A^2B\Delta u(k) + AB\Delta u(k+1) + B\Delta u(k+2); \\ \vdots \\ \Delta x(k+p|k) = A^p\Delta x(k) + A^{p-1}B\Delta u(k) + A^{p-2}B\Delta u(k+1) + \dots + A^{p-c}B\Delta u(k+c-1), \end{cases}$$

а также

$$\begin{cases} y(k+1|k) = C\Delta x(k+1|k) + y(k) = CA\Delta x(k) + CB\Delta u(k) + y(k); \\ y(k+2|k) = (CA^2 + CA)\Delta x(k) + (CAB + CB)\Delta u(k) + CB\Delta u(k+1) + y(k); \\ \vdots \\ y(k+p|k) = \sum_{i=1}^p CA^i \Delta x(k) + \sum_{i=1}^p CA^{i-1} B\Delta u(k) + \\ + \sum_{i=1}^{p-1} CA^{i-1} B\Delta u(k+1) + \dots + \sum_{i=1}^{p-c+1} CA^{i-1} B\Delta u(k+c-1) + y(k). \end{cases}$$

Кроме того, можно записать

$$Y(k+1|k) = \alpha\Delta x(k) + \beta\Delta U(k) + \gamma y(k),$$

где

$$Y(k+1|k) = \begin{bmatrix} y(k+1|k) \\ \vdots \\ y(k+p|k) \end{bmatrix}, \gamma = \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix};$$

$$\Delta U(k) = \begin{bmatrix} \Delta u(k) \\ \vdots \\ \Delta u(k+c-1) \end{bmatrix}, \alpha = \begin{bmatrix} CA \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^p CA^i \end{bmatrix}.$$

Целевую функцию в уравнении можно выразить как

$$J(x(t), \Delta U(k), c, p) = \|\mu_1(Y(k+1|k)) - R(k+1)\|^2 + \|\mu_2\Delta U\|^2,$$

где  $\mu_1, \mu_2$  – веса регуляризации;  $R$  – заданные значения.

Таким образом, оптимизационная задача предиктивного управления может быть выражена с помощью формул:

$$\begin{aligned} & \text{Min}(J(x(t), \Delta U(k), c, p)); \\ & \frac{\partial(J(x(t), \Delta U(k), c, p))}{\partial(\Delta U(k))} = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Тогда локально-оптимальное решение в  $k$ -й момент может быть получено следующим образом:

$$\Delta U(k) = (\beta^T \mu_1^T \mu_1 + \mu_2^T \mu_2)^{-1} \beta^T \mu_1^T \mu_1 (R(k+1) - \alpha \Delta x(k) - \gamma u(k)).$$

Поскольку вычисление формулы является локально-оптимальным решением системы, полученным в разомкнутом состоянии в момент времени  $k$ , сама система будет нарушена многими неопределенными факторами. Следовательно, полученное решение не может удовлетворять требованиям хорошего отслеживания целевой кривой. Система должна вводить обратную связь. Тогда управляющие воздействия в реальном времени могут быть определены как

$$\Delta u(k) = [1 \ 0 \ \dots \ 0] \Delta U(k).$$

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим результаты внедрения УПМ-регулятора технологического индекса качества при нечетком взаимодействии температуры поверхности слоя зеленого чая с влажностью чайных листьев (рис. 10).

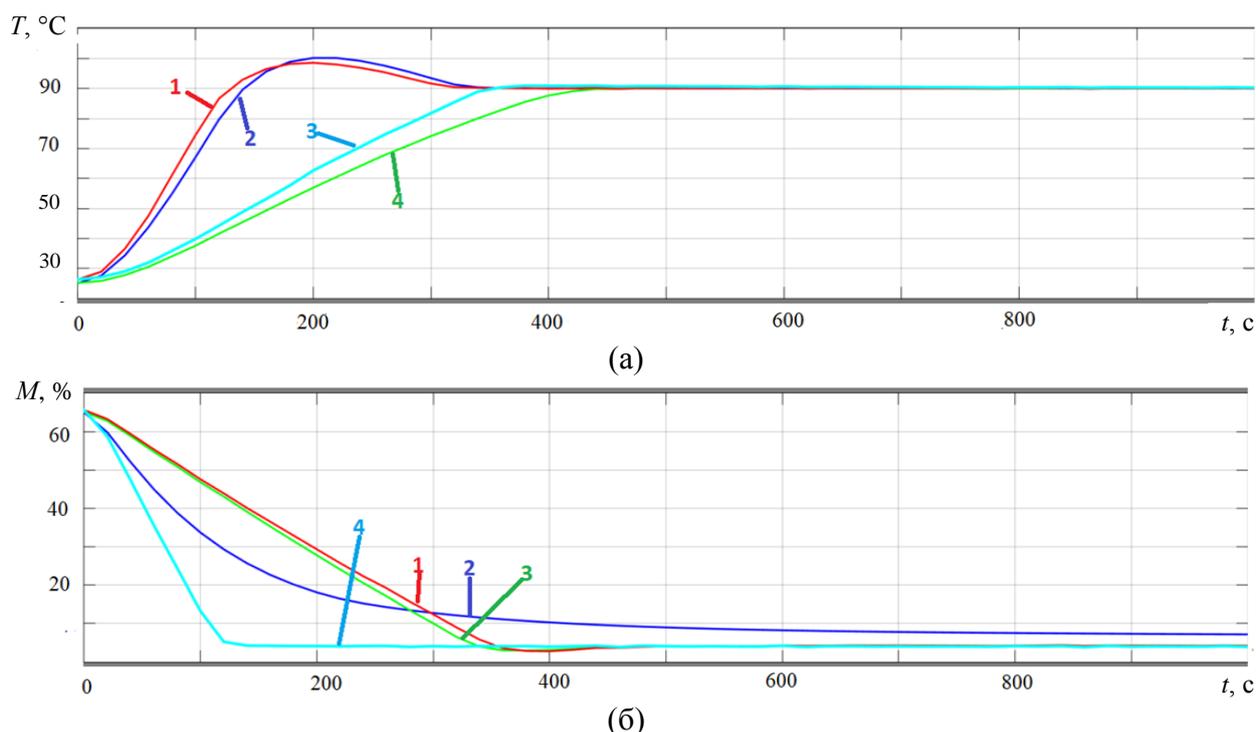


Рис. 10. Результаты моделирования различных регуляторов: температура слоя чая (а); влажность (б); 1 – регулятор без технологического индекса качества при нечетком взаимодействии температуры и влажности; 2 – регулятор без технологического индекса качества при четком взаимодействии температуры и влажности; 3 – регулятор технологического индекса качества при нечетком взаимодействии температуры и влажности; 4 – регулятор технологического индекса качества при четком взаимодействии температуры и влажности

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам моделирования можно сделать выводы:

1. При применении технологического индекса качества к модели управления результаты контроля более стабильны и точны.

2. При использовании обратной нечеткой зависимости между температурой и влажностью процесса сушки зеленого чая время стабилизации процесса сокращается.

Результаты численного моделирования показывают, что УПИМ-контроллер с учетом технологического индекса качества работает стабильно и эффективно в условиях устранения входных шумов. Система обеспечивает относительно быстрое реагирование с точки зрения комплексного устранения ошибок и устойчивого состояния при сушке.

## БЛАГОДАРНОСТИ

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

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лемпого Ф. Моделирование и управление технологическим процессом термообработки какао-бобов. Дисс... канд. техн. наук. Тверь. 2015. 174 с.

2. Комиссаров Ю.А., Гордеев Л.С., Вент Д.П. Процессы и аппараты химической технологии / под ред. Ю.А. Комиссарова. М.: Химия. 2011. 1239 с.

3. Пучков М.Н. Среда автоматизированного моделирования сушильных аппаратов. Дисс... канд. техн. наук. Москва. 2002. 198 с.

4. Лыков А.В. Тепломассообмен: справочник. М.: Энергия. 1978. 479 с.

5. Vajta M. Nyquist stability test for a parabolic partial differential equation // *IASTED Conf. on Modeling, Identification and Control*. Innsbruck. 2000. P. 296–299.

6. Vajta M. Stability test for a parabolic partial differential equation // *9th Mediterranean Conference on Control and Automation*. Zagreb: KoREMA Secretariat. 2001. P. 151.

7. Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети: учебное пособие. М.: Физматлит. 2001. 224 с.

8. Гоичкин Н.А. Диагностика состояний и управление технологической безопасностью с использованием индекса безопасности (на примере цеха выпарки производства хлора и каустика). Дисс... канд. техн. наук. Апатиты. 2006. 215 с.

9. Киселева М.Ю., Смагин В.И. Управление с прогнозирующей моделью с учетом запаздывания по управлению // *Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика*. 2010. № 2 (11). С. 5–12.

10. Las Koop, Loyse Tussolini A dynamic two-dimensional model for deep-bed drying of mate leaves (*Plex paraguariensis*) in a single-pass/single-zone conveyor-belt dryer // *Drying Technology*. 2015. V. 33. № 2. P. 185–193.

**Для цитирования:** Фам К.Б., Мурашев П.М., Богатилов В.Н. Прогнозирующее управление индексом качества процесса сушки зеленого чая // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 4 (16). С. 63–76.

## **PREDICTIVE CONTROL OF THE QUALITY INDEX OF THE 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., 170026, Tver,  
Russian Federation, e-mail: phambang79520897405@gmail.com

This paper describes the design, modeling and implementation of an automatic control system based on predictive control, taking into account the technological quality index for controlling air temperature and conveyor belt speed in a green tea dryer chamber with a fuzzy interaction between the surface temperature of the green tea layer and the moisture content of tea leaves. This automatic control system simulation was carried out using MatLab and Simulink. The results of numerical simulation show that the predictive control based on the technology quality index is stable and reliable in terms of suppression of input noise, and compared with the conventional multi-loop PID controller, the control system based on the technology quality index results in a significant improvement in the performance and control of the drying process.

*Keywords:* green tea drying, predictive control, automated control system simulation, conveyor belt dryer, technological quality index.

Поступила в редакцию/received: 03.07.2022; после рецензирования/revised: 24.07.2022;  
принята/accepted: 01.09.2022

УДК 681.518.3

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ И ВЛАЖНОСТНЫХ ПРОЦЕССОВ В КАМЕРЕ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ**

А.В. КАЙЧЕНОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, В.В. ЕРЕЩЕНКО<sup>1</sup>, ст. препод.,  
В.В. ЯЦЕНКО<sup>1</sup>, канд. техн. наук, И.Г. БЛАГОВЕЩЕНСКИЙ<sup>2</sup>, д-р техн. наук

<sup>1</sup>Мурманский государственный технический университет,  
183010, Мурманск, Спортивная ул., 13, e-mail: kaychenovav@mstu.edu.ru

<sup>2</sup>Московский государственный университет пищевых производств,  
125080, Москва, Волоколамское ш., 11, e-mail: igblagov@mgupp.ru

© Кайченев А.В., Ерещенко В.В., Яценко В.В., Благовещенский И.Г., 2022

Рассмотрена математическая модель, описывающая динамические свойства камеры обезвоживания малогабаритной сушильной установки для поиска оптимальных технологических режимов УПОР-М. Математическая модель определяет связь температуры и влагосодержания приточного воздуха и сушильного агента внутри камеры обезвоживания. Приведены описание экспериментальной части исследований и результаты сравнения теоретических и экспериментальных данных.

*Ключевые слова:* сушильная камера, математическая модель, процессы обезвоживания, экспериментальная модель.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2022-4-76-87**

*Вестник Тверского государственного технического университета.  
Серия «Технические науки». № 4 (16), 2022*