

## **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

© Кайченнов 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*

## ВВЕДЕНИЕ

В производстве различной пищевой, в том числе сушеной, продукции этап удаления влаги, как правило, является наиболее энергоемким. Для понимания изменений, происходящих в процессе сушки, оптимизации режимов функционирования сушильной камеры с целью предотвращения нежелательных потерь качества требуется детальное изучение рабочих процессов. Это возможно путем математического моделирования, которое должно учитывать особенности конструкции камеры сушки и условия тепло- и массопереноса.

Разработка и применение математической модели позволят исследовать динамику процесса сушки, разработать пути оптимизации производительности сушильной камеры с точки зрения энергопотребления, повысить эффективность и качество продукции при экономии временных и финансовых затрат. Вопросам математического моделирования систем управления процессом обезвоживания сырья исследователи уделяют большое внимание [1–3]. Часть работ посвящена численному моделированию процессов сушки, в том числе с использованием нейронных сетей [4–6]. Ряд исследователей занимаются вопросами развязки контуров управления температурой и влажностью в промышленных установках [7, 8]. Разработка математических моделей процессов обезвоживания сырья является актуальной задачей. Решение этой задачи сопряжено с получением теоретических и экспериментальных моделей процесса.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования является камера малогабаритной сушильной установки для поиска оптимальных технологических режимов УПОР-М [9]. Камера имеет малые размеры по сравнению с промышленными установками (0,4 × 0,4 × 0,6 м), теплоизолированный корпус, низкое потребление электроэнергии по сравнению с промышленными установками, регулируемую скорость потока сушильного агента в диапазоне от 0 до 2,5 м/с, систему рециркуляции теплоносителя, управление температурой, контроль относительной влажности входящего воздуха и циркулирующего теплоносителя в установке, средства учета затрат электроэнергии, возможность сбора и архивации параметров технологического процесса.

Математическая модель камеры сушки как объекта регулирования по каналам температуры и относительной влажности должна описывать связи параметров по каналам: температура приточного воздуха ( $T_{\text{прит}}$ ) – температура воздуха в камере ( $T_{\text{кам}}$ ); влагосодержание приточного воздуха ( $d_{\text{прит}}$ ) – влагосодержание воздуха в камере ( $d_{\text{кам}}$ ).

При выводе математической модели, описывающей динамические свойства камеры, использованы уравнения тепловлажностного баланса. В настоящей работе не рассматривались члены уравнения с пренебрежимо малым взаимодействием в общем балансе.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Получение теоретической модели камеры сушки.** По каналу «температура приточного воздуха – температура воздуха в камере» использовали уравнение теплового баланса для камеры. Камеру обезвоживания рассматривали как объект с сосредоточенными параметрами.

$$M_{\text{возд. кам}} \cdot c_{\text{возд}} \cdot \frac{dT_{\text{кам}}}{dt} = G_{\text{прит}} \cdot c_{\text{возд}} \cdot (T_{\text{прит}} - T_{\text{кам}}) + Q_{\text{изб}}, \quad (1)$$

где  $M_{\text{возд. кам}}$  – масса воздуха в камере, кг;  $c_{\text{возд}}$  – удельная теплоемкость воздуха, кДж/(кг · °С);  $G_{\text{прит}}$  – расход приточного воздуха, кг/с;  $T_{\text{кам}}$  – температура воздуха в

камере, °С;  $T_{\text{прит}}$  – температура приточного воздуха, °С;  $Q_{\text{изб}}$  – общие теплоизбытки в камере, кДж/с.

Теплоизбытки в камере из уравнения (1)

$$Q_{\text{изб}} = Q_{\text{огр}} + Q_{\text{вн}} + Q_{\text{инф}}, \quad (2)$$

где  $Q_{\text{огр}}$  – суммарные теплопритоки через ограждения, кДж/с;  $Q_{\text{вн}}$  – суммарные внутренние теплопритоки, кДж/с;  $Q_{\text{инф}}$  – тепло, вносимое воздухом при инфильтрации, кДж/с.

Суммарные притоки через ограждения

$$Q_{\text{огр}} = \frac{F_{\text{огр}}}{R_{\text{огр}}} \cdot (T_{\text{кам}} - T_{\text{нар}}), \quad (3)$$

где  $F_{\text{огр}}$  – площадь ограждающей конструкции, м<sup>2</sup>;  $R_{\text{огр}}$  – сопротивление теплопередаче конструкции ограждения, м<sup>2</sup> · °С · с/кДж;  $T_{\text{кам}}$  – температура воздуха в камере, °С;  $T_{\text{нар}}$  – температура наружного воздуха, °С.

Величина сопротивления теплопередаче многослойного ограждения

$$R_{\text{огр}} = R_{\text{вн}} + R_{\text{сл}} + R_{\text{нар}}, \quad (4)$$

где  $R_{\text{вн}}$  – сопротивление теплопереходу у внутренней поверхности ограждения, м<sup>2</sup> · °С · с/кДж;  $R_{\text{сл}}$  – суммарное термическое сопротивление отдельных слоев ограждения, м<sup>2</sup> · °С · с/кДж;  $R_{\text{нар}}$  – сопротивление теплопереходу у наружной поверхности ограждения, м<sup>2</sup> · °С · с/кДж.

Суммарные внутренние теплопритоки в камере из уравнения (2)

$$Q_{\text{вн}} = Q_{\text{сыр}}, \quad (5)$$

где  $Q_{\text{сыр}}$  – теплоприток от сырья, кДж/с.

Теплоприток от продукта

$$Q_{\text{сыр}} = M_{\text{сыр}} \cdot c_{\text{сыр}} \cdot (T_{\text{сыр}} - T_{\text{кам}}), \quad (6)$$

где  $M_{\text{сыр}}$  – масса сырья в камере, кг;  $c_{\text{сыр}}$  – удельная теплоемкость сырья, кДж/(кг · °С);  $T_{\text{сыр}}$  – температура сырья, °С;  $T_{\text{кам}}$  – температура в камере, °С.

Тепло, вносимое воздухом при инфильтрации:

$$Q_{\text{инф}} = G_{\text{инф}} \cdot c_{\text{возд}} \cdot (T_{\text{нар}} - T_{\text{кам}}), \quad (7)$$

где  $G_{\text{инф}}$  – расход инфильтрационного воздуха, кг/с;  $c_{\text{возд}}$  – удельная теплоемкость воздуха, кДж/(кг · °С);  $T_{\text{нар}}$  – температура наружного воздуха, °С;  $T_{\text{кам}}$  – температура воздуха в камере, °С.

С учетом формул (2)–(7) уравнение (1) принимает вид

$$\begin{aligned} M_{\text{возд. кам}} \cdot c_{\text{возд}} \cdot \frac{dT_{\text{кам}}}{d\tau} = & G_{\text{прит}} \cdot c_{\text{возд}} \cdot (T_{\text{прит}} - T_{\text{кам}}) + \\ & + \frac{F_{\text{огр}}}{R_{\text{огр}}} \cdot (T_{\text{кам}} - T_{\text{нар}}) + M_{\text{сыр}} \cdot c_{\text{сыр}} \cdot (T_{\text{сыр}} - T_{\text{кам}}) + \\ & + G_{\text{инф}} \cdot c_{\text{возд}} \cdot (T_{\text{нар}} - T_{\text{кам}}). \end{aligned} \quad (8)$$

После преобразований уравнение (8) выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} & \frac{M_{\text{возд. кам}} \cdot c_{\text{возд}}}{G_{\text{прит}} \cdot c_{\text{возд}} - \frac{F_{\text{огр}}}{R_{\text{огр}}} + M_{\text{сыр}} \cdot c_{\text{сыр}} + G_{\text{инф}} \cdot c_{\text{возд}}} \cdot \frac{dT_{\text{кам}}}{d\tau} + T_{\text{кам}} = \\ & = \frac{G_{\text{прит}} \cdot c_{\text{возд}}}{G_{\text{прит}} \cdot c_{\text{возд}} - \frac{F_{\text{огр}}}{R_{\text{огр}}} + M_{\text{сыр}} \cdot c_{\text{сыр}} + G_{\text{инф}} \cdot c_{\text{возд}}} \cdot T_{\text{прит}} + \\ & + \frac{M_{\text{сыр}} \cdot c_{\text{сыр}}}{G_{\text{прит}} \cdot c_{\text{возд}} - \frac{F_{\text{огр}}}{R_{\text{огр}}} + M_{\text{сыр}} \cdot c_{\text{сыр}} + G_{\text{инф}} \cdot c_{\text{возд}}} \cdot T_{\text{сыр}} + \\ & + \frac{G_{\text{инф}} \cdot c_{\text{возд}} - \frac{F_{\text{огр}}}{R_{\text{огр}}}}{G_{\text{прит}} \cdot c_{\text{возд}} - \frac{F_{\text{огр}}}{R_{\text{огр}}} + M_{\text{сыр}} \cdot c_{\text{сыр}} + G_{\text{инф}} \cdot c_{\text{возд}}} \cdot T_{\text{нар}}. \end{aligned} \quad (9)$$

При введении обозначений  $T_{\text{п. в. кам}}$ ,  $k_{\text{к. п. прит}}$ ,  $k_{\text{к. п. сыр}}$ ,  $k_{\text{к. п. нар}}$  уравнение (9) принимает вид

$$\begin{aligned} T_{\text{п. в. кам}} \cdot \frac{dT_{\text{кам}}}{d\tau} + T_{\text{кам}} = k_{\text{к. п. прит}} \cdot T_{\text{прит}} + \\ + k_{\text{к. п. сыр}} \cdot T_{\text{сыр}} + k_{\text{к. п. нар}} \cdot T_{\text{нар}}, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $T_{\text{п. в. кам}}$  – постоянная времени камеры;  $k_{\text{к. п. прит}}$ ,  $k_{\text{к. п. сыр}}$ ,  $k_{\text{к. п. нар}}$  – коэффициенты передачи по соответствующим каналам.

Применив к уравнению (10) преобразование Лапласа при нулевых начальных условиях, получим передаточную функцию камеры по регулирующему воздействию  $W_{\text{кам. темп}}(p)$  и передаточную функцию камеры по возмущающим воздействиям  $W_{\text{кам. сыр}}(p)$ ,  $W_{\text{кам. нар}}(p)$ :

$$W_{\text{кам. темп}}(p) = \frac{k_{\text{к. п. прит}}}{T_{\text{п. в. кам}} p + 1}; \quad (11)$$

$$W_{\text{кам. нар}}(p) = \frac{k_{\text{к. п. нар}}}{T_{\text{п. в. кам}} p + 1}; \quad (12)$$

$$W_{\text{кам. сыр}}(p) = \frac{k_{\text{к. п. сыр}}}{T_{\text{п. в. кам}} p + 1}. \quad (13)$$

После подстановки числовых значений в уравнения (11)–(13) получим теоретические передаточные функции для незагруженной продуктом камеры:

$$W_{\text{кам. темп}}(p) = \frac{1,023}{1\,666,48p + 1};$$

$$W_{\text{кам. нар}}(p) = \frac{-0,023}{1\,666,48p + 1};$$

$$W_{\text{кам. сыр}}(p) = 0.$$

При выводе уравнения математической модели, описывающего динамические свойства камеры по каналу «влажность воздуха – влажность воздуха в камере», использовалось уравнение материального баланса (баланса влаги) в помещении:

$$M_{\text{возд. кам}} \cdot \frac{d(d_{\text{кам}})}{d\tau} = G_{\text{прит}} \cdot (d_{\text{прит}} - d_{\text{кам}}) + G_{\text{инф}} \cdot (d_{\text{нар}} - d_{\text{кам}}) + G_{\text{увл}} \cdot (d_{\text{увл}} - d_{\text{кам}}) + W, \quad (14)$$

где  $M_{\text{возд. кам}}$  – масса воздуха в камере, кг;  $G_{\text{прит}}$  – расход приточного воздуха, кг/с;  $G_{\text{инф}}$  – расход инфильтрующегося воздуха, кг/с;  $G_{\text{увл}}$  – расход воздуха через увлажнитель, кг/с;  $d_{\text{прит}}$  – влагосодержание приточного воздуха, г/кг;  $d_{\text{кам}}$  – влагосодержание воздуха в камере, г/кг;  $d_{\text{нар}}$  – влагосодержание инфильтрующегося воздуха, г/кг;  $d_{\text{увл}}$  – влагосодержание воздуха после увлажнителя, г/кг;  $W$  – суммарный прирост влажности, г/с.

Суммарный прирост влажности

$$W = 833 \cdot (W_{\text{сыр}} + W_{\text{др}}) = 833 \cdot W', \quad (15)$$

где 833 – коэффициент, который учитывает плотность воздуха и другие величины;  $W_{\text{сыр}}$  – прирост влажности в камере от сырья, г/с;  $W_{\text{др}}$  – прирост влажности в камере от других факторов, г/с;  $W'$  – сумма приростов влажности, г/с.

После преобразований, а также с учетом формулы (15) уравнение (14) принимает вид

$$\begin{aligned} & \frac{M_{\text{возд. кам}}}{(G_{\text{прит}} + G_{\text{инф}} + G_{\text{увл}})} \cdot \frac{d(d_{\text{кам}})}{d\tau} + d_{\text{кам}} = \\ & = \frac{G_{\text{прит}}}{(G_{\text{прит}} + G_{\text{инф}} + G_{\text{увл}})} \cdot d_{\text{прит}} + \frac{G_{\text{инф}}}{(G_{\text{прит}} + G_{\text{инф}} + G_{\text{увл}})} \cdot d_{\text{нар}} + \\ & + \frac{G_{\text{увл}}}{(G_{\text{прит}} + G_{\text{инф}} + G_{\text{увл}})} \cdot d_{\text{увл}} + \frac{833 \cdot W'}{(G_{\text{прит}} + G_{\text{инф}} + G_{\text{увл}})}. \end{aligned} \quad (16)$$

При введении обозначений  $T_{\text{п. в. кам. } d}$ ,  $k_{\text{к. п. прит. } d}$ ,  $k_{\text{к. п. нар. } d}$ ,  $k_{\text{к. п. увл. } d}$ ,  $k_{\text{к. п. прирост. } d}$  уравнение (16) преобразуется в формулу

$$\begin{aligned} & T_{\text{п. в. кам. } d} \cdot \frac{d(d_{\text{кам}})}{d\tau} + d_{\text{кам}} = \\ & = k_{\text{к. п. прит. } d} \cdot d_{\text{прит}} + k_{\text{к. п. нар. } d} \cdot d_{\text{нар}} + k_{\text{к. п. увл. } d} \cdot d_{\text{увл}} + \\ & + k_{\text{к. п. прирост. } d} \cdot W', \end{aligned} \quad (17)$$

где  $T_{\text{п. в. кам. } d}$  – постоянная времени камеры;  $k_{\text{к. п. прит. } d}$ ,  $k_{\text{к. п. нар. } d}$ ,  $k_{\text{к. п. прирост. } d}$  – коэффициенты передачи по соответствующим каналам.

Применив к уравнению (17) преобразование Лапласа при нулевых начальных условиях, получим передаточные функции камеры по регулируемому воздействию  $W_{\text{кам. темп. } d}(p)$ ,  $W_{\text{кам. прирост. } d}(p)$ ; передаточную функцию камеры по возмущающему воздействию  $W_{\text{кам. нар. } d}(p)$ :

$$W_{\text{кам. темп. } d}(p) = \frac{k_{\text{к. п. прит. } d}}{T_{\text{п. в. кам. } d} p + 1}; \quad (18)$$

$$W_{\text{кам. нар. } d}(p) = \frac{k_{\text{к. п. нар. } d}}{T_{\text{п. в. кам. } d} p + 1}; \quad (19)$$

$$W_{\text{кам. увл. } d}(p) = \frac{k_{\text{к. п. увл. } d}}{T_{\text{п. в. кам. } d} p + 1}; \quad (20)$$

$$W_{\text{кам. прирост. } d}(p) = \frac{W_{\text{кам. прирост. } d}}{T_{\text{п. в. кам. } d} p + 1}. \quad (21)$$

После подстановки числовых значений в уравнения (18)–(21) получили теоретические передаточные функции для незагруженной продуктом камеры:

$$W_{\text{кам. темп. } d}(p) = \frac{0,091}{167,21p + 1};$$

$$W_{\text{кам. нар. } d}(p) = \frac{0,00015}{167,21p + 1};$$

$$W_{\text{кам. увл. } d}(p) = \frac{0,91}{167,21p + 1};$$

$$W_{\text{кам. прирост. } d}(p) = 0.$$

Из теории тепловлажностной обработки воздуха известно, что температура ограничивает максимальное влагосодержание, а при адиабатическом увлажнении увеличение влагосодержания оказывает влияние на температуру, понижая ее. Учтем эти каналы, введя передаточные функции  $W_{\text{св.1}}(p)$  и  $W_{\text{св.2}}(p)$ . Коэффициенты передачи этих передаточных функций находятся из уравнений взаимосвязи параметров влажного воздуха.

С учетом полученных передаточных функций (11)–(13), (18)–(21) и введенных взаимосвязей контуров  $W_{\text{св.1}}(p)$  и  $W_{\text{св.2}}(p)$  структурная схема камеры сушки как объекта регулирования будет иметь вид, показанный на рис. 1.

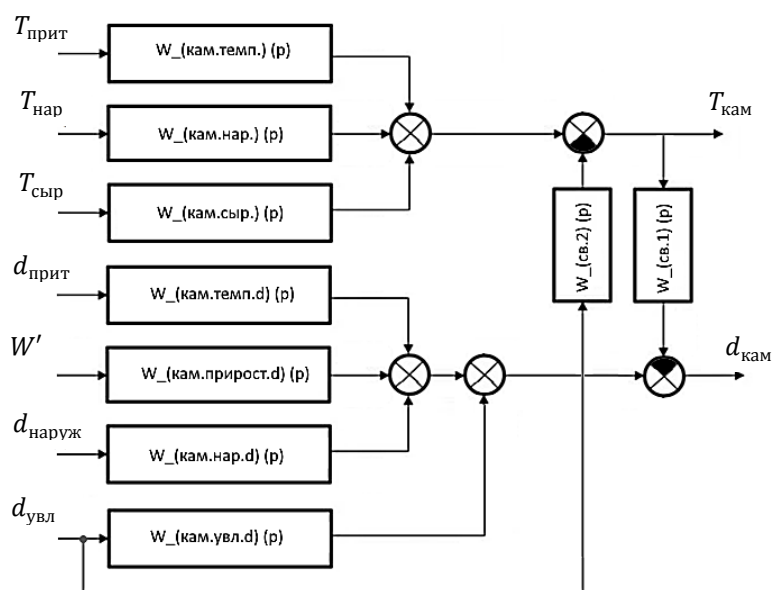


Рис. 1. Структурная схема камеры сушки как объекта регулирования

**Получение экспериментальной модели камеры сушки.** С учетом теоретической модели камеры сушки в данном исследовании создана экспериментальная модель и проведено сравнение теоретических и экспериментальных данных.

Экспериментальная модель получена на основе результатов проведенных экспериментов с одним входом и выходом и несколькими входами и выходами в одной секции камеры установки УПОР-М:

- 1) эксперимента для изучения внутренней температуры;
- 2) эксперимента для изучения внутреннего влагосодержания;
- 3) эксперимента для изучения связи внутренней температуры и влагосодержания.

Коэффициенты передаточных функций получены из экспериментальных данных с использованием программного продукта AutoCont Lite: SeekerC [10].

**Эксперимент для изучения внутренней температуры.** Параметры передаточной функции по изменению температуры в камере установки УПОР-М получены из эксперимента при исходных значениях температуры и влагосодержания 18,61 °С и 4,2 г/кг соответственно. На рис. 2 показан вид переходного процесса эксперимента (оранжевым цветом) и модели (зеленым цветом) при входном воздействии (синим цветом). Максимальное отклонение значений модели от экспериментальных данных не превышает 5 %.

Передаточная функция с экспериментально полученными параметрами имеет вид

$$W_{\text{кам. темп}}(p) = \frac{1}{1\,923,46p + 1}$$

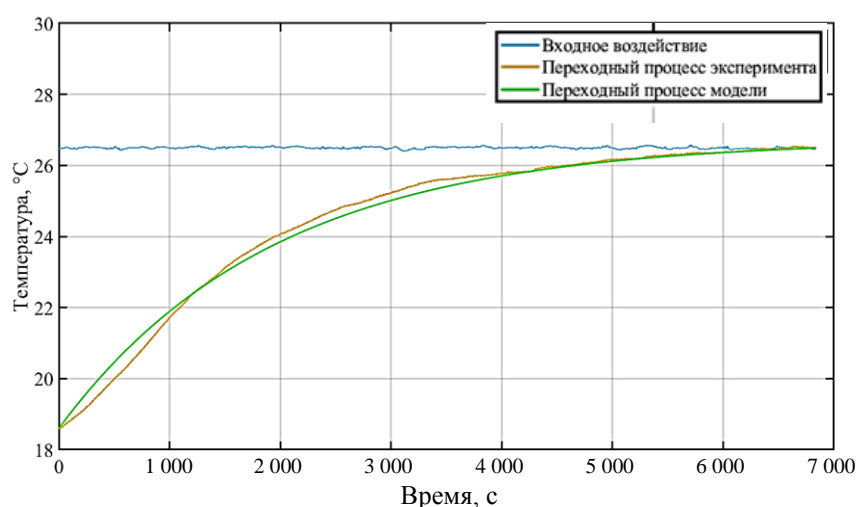


Рис. 2. Графики переходных процессов при определении коэффициентов экспериментальной передаточной функции по температуре

**Эксперимент для изучения изменения влагосодержания в камере сушки.** Параметры передаточной функции по изменению влагосодержания в камере получены из эксперимента при исходных значениях температуры и влагосодержания 17,5 °С и 3,77 г/кг. На рис. 3 показан вид переходного процесса эксперимента (оранжевым цветом) и модели (зеленым цветом) при входном воздействии (синим цветом). Максимальное отклонение значений модели от экспериментальных данных не превышает 10 %. Передаточная функция с экспериментально полученными параметрами имеет вид

$$W_{\text{кам. темп. d}}(p) = \frac{1}{134,372p + 1}$$

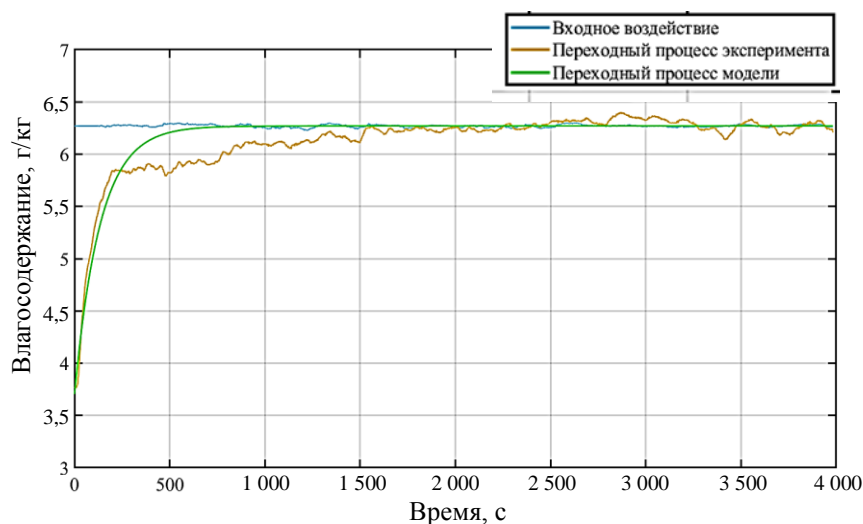


Рис. 3. Графики переходных процессов при определении коэффициентов экспериментальной передаточной функции по влагосодержанию

**Эксперимент для изучения связи температуры и влагосодержания в камере сушки.** Камера сушки представляет собой многосвязный объект. Зависимость между температурой и влагосодержанием означает, что управление таким объектом может быть сложной задачей, поскольку изменение регулирующего воздействия по одному каналу приводит к изменению в другом.

На рис. 4 представлен переходный процесс при изменении воздействий по исследуемым каналам, показывающий влияние контуров управления друг на друга в камере сушки.

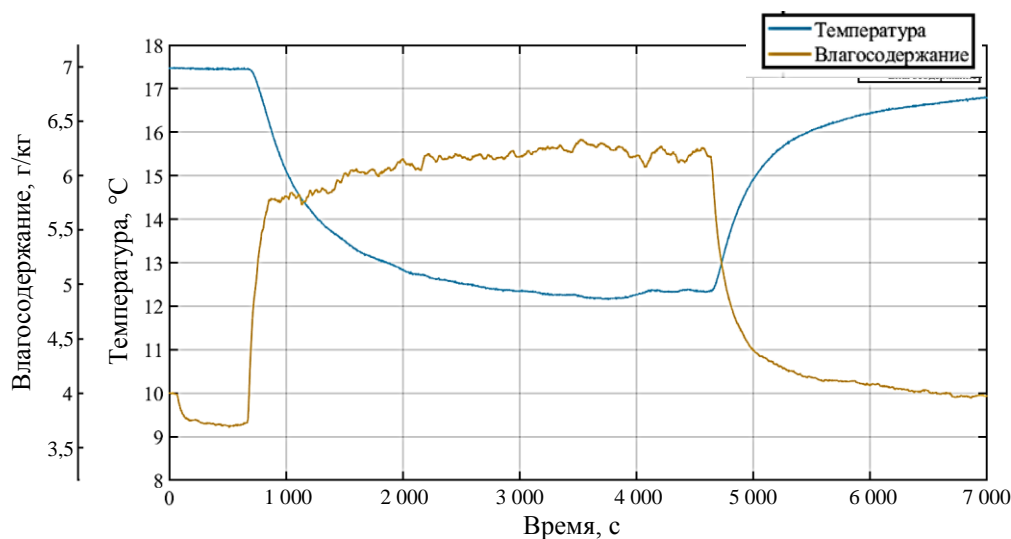


Рис. 4. Переходные процессы при изменении воздействий. Взаимосвязь параметров

Передаточная функция с экспериментально полученными параметрами  $W_{св.2}(p)$  по каналу «влагосодержание увлажненного воздуха ( $d_{увл}$ ) – изменение температуры в камере ( $T_{увл}$ )» получена из эксперимента (рис. 5) и имеет вид

$$W_{св.2}(p) = \frac{2,48}{150,067p + 1}$$



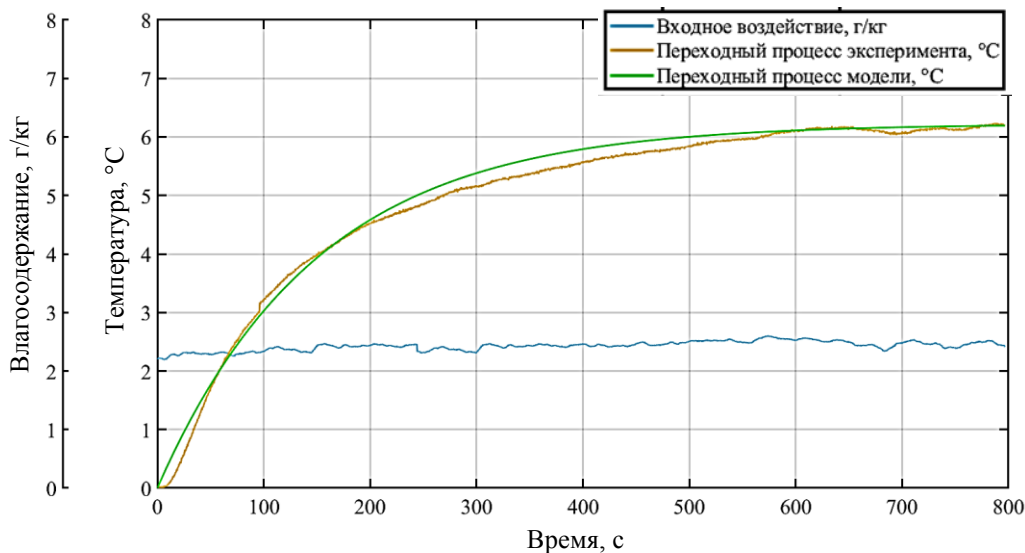


Рис. 5. Графики переходных процессов при определении коэффициентов экспериментальной передаточной функции  $W_{св.2}(p)$

Вид переходного процесса эксперимента (показан оранжевым цветом) и модели (показан зеленым цветом) при входном воздействии (показан синим цветом), являющемся функцией от влажосодержания, представлен на рис. 5. Максимальное отклонение значений модели от экспериментальных данных не превышает 8 %.

Сравнение переходных процессов, полученных с применением теоретической и экспериментальной моделей, проведено в среде MatLab в соответствии со структурной схемой, представленной на рис. 6. Сопоставление трех переходных процессов (рис. 7–9) осуществлялось последовательно. На первом этапе происходило моделирование нагрева до температуры 18,5 °С с увеличением влажосодержания до 4 г/кг. На втором этапе (с 10 000-й с) происходил нагрев камеры от 18,5 до 26,5 °С. На третьем (с 20 000-й с) проводилось моделирование увлажнения с изменением влажосодержания от 4 до 6 г/кг (рис. 10).

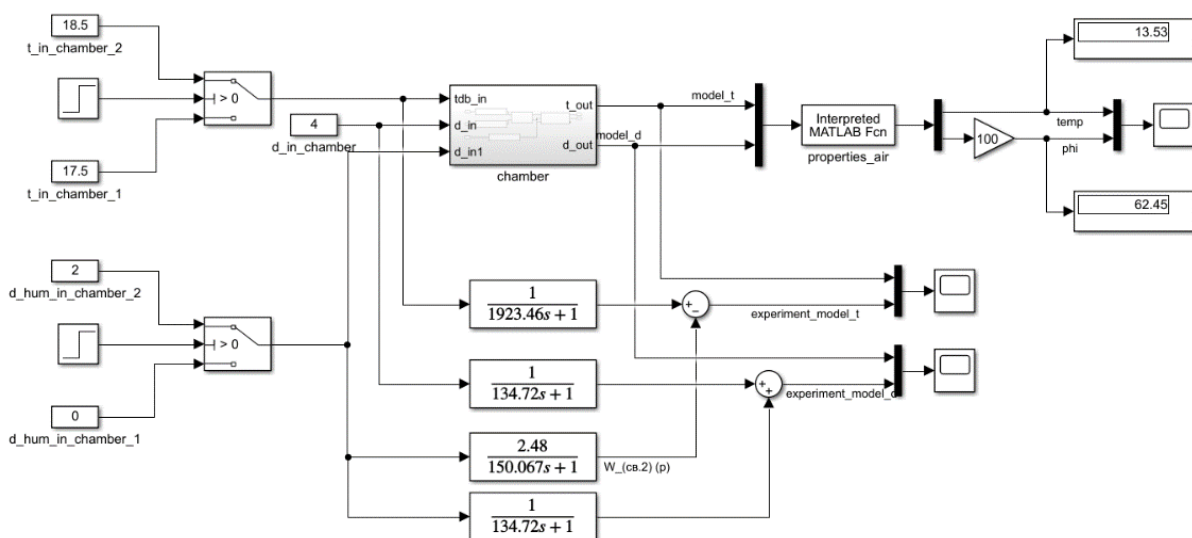


Рис. 6. Структурная схема сравнения переходных процессов, полученных с применением теоретической и экспериментальной модели

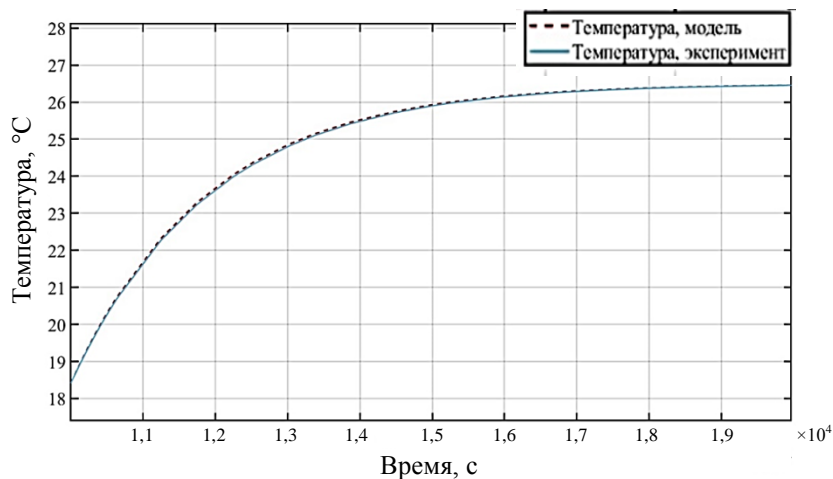


Рис. 7. Результаты сравнения переходных процессов по каналу «температура приточного воздуха ( $T_{\text{прит}}$ ) – температура воздуха в камере ( $T_{\text{кам}}$ )»

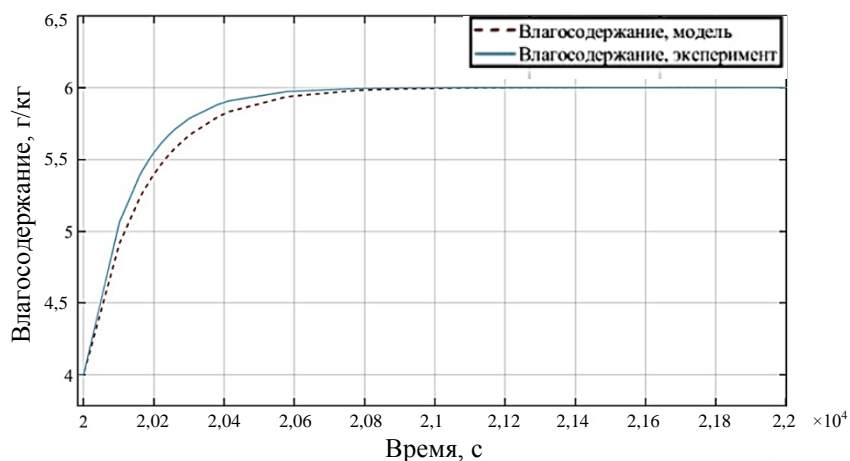


Рис. 8. Результаты сравнения переходных процессов по каналу «влагодержание приточного воздуха ( $d_{\text{прит}}$ ) – влагодержание воздуха в камере ( $d_{\text{кам}}$ )»

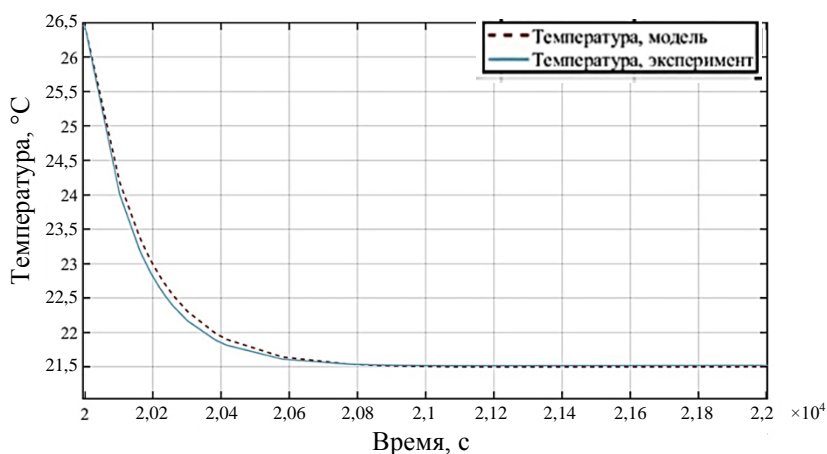


Рис. 9. Результаты сравнения переходных процессов по каналу «влагодержание увлажненного воздуха ( $d_{\text{увл}}$ ) – изменение температуры в камере ( $T_{\text{увл}}$ )»

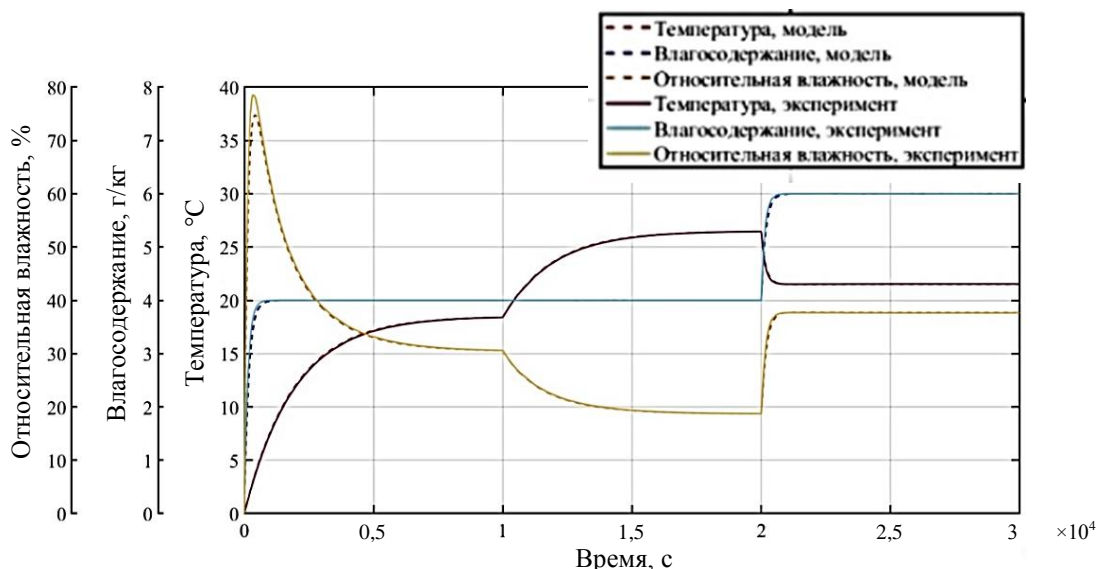


Рис. 10. Графики экспериментального исследования температурных и влажностных процессов

Результаты сравнения графиков переходных процессов теоретической и экспериментальной моделей показали высокую степень близости полученных данных. Максимальное отклонение значений модели от экспериментальных данных не превысило 5 % по температуре и 10 % по влагосодержанию.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования говорят о том, что можно проводить численное моделирование тепловлажностных процессов внутри камеры сушки. Синтез регулятора для установки УПОР-М дает возможность получать оптимальные по качеству управления настройки системы. Совмещение результатов моделирования процессов в сушильной камере с моделями обезвоживания сырья способствует получению режимов обезвоживания, оптимальных по затратам энергии и времени. Совокупное моделирование процессов обезвоживания с экспериментально полученными результатами сушки позволяет проводить цифровую сертификацию режимов, чтобы использовать их для промышленных сушильных установок.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 22-26-20116.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Грибков А.Н. Функциональное и информационное моделирование информационно-управляющей системы сушильными установками // *Инженерная физика*. 2009. № 6. С. 36–39.
2. Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Яровой И.И., Борщ А.А. Моделирование процессов обезвоживания пищевого сырья в электромагнитном поле // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2013. № 3 (57). С. 62–65.
3. Ершов М.А., Ершов А.М., Лыжин Е.В., Гроховский В.А., Димова Ж.Г. Моделирование процессов обезвоживания провесной и вяленой рыбы // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2021. Т. 83. № 1 (87). С. 55–61.

4. Defraeye T. Advanced computational modelling for drying processes: a review // *Applied Energy*. 2014. V. 131. P. 323–344.

5. Jay S. Assessment of industrial energy utilisation and efficiency of drying systems and the modelling of drying characteristics using neural networks. Birmingham: Aston University. 1998. P. 1357.

6. Kiranoudis C. T., Maroulis Z. B., Marinou-Kouris D. Heat and mass transfer model building in drying with multiresponse data // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1995. V. 38. № 3. P. 463–480.

7. Wang L., Zhu Z. Research on Temperature and humidity decoupling control of constant temperature and humidity test chamber // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing. 2020. V. 711. № 1. P. 012104.

8. Патент РФ 136962 на полезную модель. *Малогабаритная установка для поиска оптимальных технологических режимов сушки сырья* / Селяков И.Ю., Кайченков А.В., Маслов А.А., Ершов М.А., Аминов В.А. Заявл. 13.05.2013. Оpubл. 27.01.2014. Бюл. № 3.

9. Песков Н.П., Нажимова Н.А. Математическое моделирование технологического процесса ректификации этаноламинов // *Математические методы в технике и технологиях – ММТТ*. 2013. № 9-1 (59). С. 183–184.

10. Свидетельство РФ 2020660156 о государственной регистрации программы для ЭВМ. *AutoCont Lite: SeekerC* / Жук А.А. Заявл. 18.08.2020. Оpubл. 28.08.2020. Бюл. № 9.

**Для цитирования:** Кайченков А.В., Ерещенко В.В., Яценко В.В., Благовещенский И.Г. Математическое моделирование тепловых и влажностных процессов в камере обезвоживания пищевых продуктов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 4 (16). С. 76–87.

## MATHEMATICAL MODELING OF THERMAL AND HUMIDITY PROCESSES IN THE FOOD DRYING CHAMBER

A.V. KAYCHENOV<sup>1</sup>, Cand. Sc., V.V. ERESHCHENKO<sup>1</sup>, Senior Lecturer,  
V.V. YATSENKO<sup>1</sup>, Cand. Sc., I.G. BLAGOVESHCHENSKY<sup>2</sup>, Dr. Sc.

<sup>1</sup>Murmansk State Technical University, 13, Sportivnaya str., 183010, Murmansk,  
Russian Federation, e-mail: kaychenovav@mstu.edu.ru

<sup>2</sup>Moscow State University of Food Production, 11, Volokolamsk Hwy, 125080, Moscow,  
Russian Federation, e-mail: igblagov@mgupp.ru

The article considers a mathematical model describing the dynamic properties of the drying chamber of a small-sized drying plant (UPOR-M) for the search for optimal technological regimes. The mathematical model determines the relationship between the temperature and moisture content of the supply air and the drying agent inside the dewatering chamber. The article also describes the experimental part of the research and the results of comparing theoretical and experimental data.

**Keywords:** drying chamber, mathematical model, dehydration process, experimental model.

Поступила в редакцию/received: 21.07.2022; после рецензирования/revised: 30.08.2022;  
принята/accepted: 12.09.2022