

СТАТЬИ

УДК 519.7

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ
ПРОЦЕССОМ СУШКИ ПАСТООБРАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ
В ВАЛЬЦЕ-ЛЕНТОЧНЫХ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ**¹Артемова С.В., ¹Шмелева А.Г., ²Каменская М.А., ¹Бесхмельнов М.И., ¹Митяков Е.С.¹ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», Москва,e-mail: sartemova@yandex.ru, ann_shmeleva@mail.ru, masonsky.bes@gmail.com, iyao@mail.ru;²ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», Тамбов,e-mail: art_mari@bk.ru

В работе приведены этапы формирования интеллектуальной системы управления процессом сушки, которая позволяет в реальном времени синтезировать управляющие воздействия, способные нивелировать потери качества производимой продукции и повышать эффективность процесса сушки. Объектом управления выступает вальце-ленточная установка для сушки пастообразного красного типографского красителя, обладающая в ходе реальной эксплуатации способностью к изменению ключевых режимных параметров процесса сушки, а также высокими требованиями к надлежшему его обеспечению. Применяемое в системе устройство управления функционирует с учетом вероятных изменений ситуаций в процессе сушки, поскольку, как правило, идентификация выходных параметров запаздывает от используемых управляющих воздействий. В этой связи на этапе анализа введены разнообразие классы задач управления и задано конечное множество сценариев функционирования системы. Для синтеза управляющих воздействий введены лингвистические переменные, включенные в производственные правила, которые отвечают требованиям введенных классов задач. Предложенная в работе интеллектуальная информационно-управляющая система позволяет осуществлять управление процессом сушки пастообразных материалов по заданным критериям, обеспечить рост производительности на 5% и выход вероятности выпуска качественной продукции до 0,98.

Ключевые слова: сушка пастообразных материалов, интеллектуальная система управления, анализ и синтез управляющих воздействий, лингвистические переменные, нечеткая логика

**INTELLIGENT CONTROL SYSTEM FOR THE DRYING PROCESS
OF PASTY MATERIALS IN ROLLER-BELT DRYING PLANTS**¹Artemova S.V., ¹Shmeleva A.G., ²Kamenskaya M.A., ¹Beskhmelnov M.I., ¹Mityakov E.S.¹MIREA – Russian Technological University, Moscow, e-mail: sartemova@yandex.ru,ann_shmeleva@mail.ru, masonsky.bes@gmail.com, iyao@mail.ru;²Tambov State Technical University, Tambov, e-mail: art_mari@bk.ru

The paper presents the stages of formation of an intelligent control system for the drying process, which allows real-time synthesis of control actions that can level the loss of product quality and increase the efficiency of the drying process. The object of control is an installation for drying a paste-like red printing dye of a roller-belt type, which, during actual operation, has the ability to change the key operating parameters of the drying process, as well as high requirements for its proper provision. The control device used in the system operates taking into account the likely changes in situations during the drying process, since, as a rule, the identification of the output parameters lags behind the control actions used. In this regard, at the stage of analysis, various classes of control problems are introduced and a finite set of scenarios for the functioning of the system is specified. For the synthesis of control actions, linguistic variables are introduced that are included in the production rules that meet the requirements of the introduced classes of problems. The intellectual information and control system proposed in the work allows to control the process of drying paste-like materials according to specified criteria, to ensure an increase in productivity by 5% and an output of the probability of producing high-quality products up to 0,98.

Keywords: drying of pasty materials, intelligent control system, analysis and synthesis of control actions, linguistic variables, fuzzy logic

Сушка материалов – один из наиболее энергоемких процессов в сельском хозяйстве, промышленности и других отраслях народного хозяйства. При этом целесообразно проводить мониторинг не только качества готовой продукции, но и всего технологического процесса, его технико-экономических индикаторов в целом. Данная цель диктует необходимость разработки и имплементации соответствующей интеллектуальной системы управления (ИСУ), которая позволит повысить эффективность процесса сушки.

При формировании ИСУ необходим учет ключевых характеристик сушильных установок вальце-ленточного типа. К ним можно отнести: значительное энергопотребление; взаимодействие камер сушильной установки; потребность в мониторинге параметров технологического процесса с целью их поддержания на заданном уровне [1, 2].

В таких установках в управляющие воздействия включены два вида составляющих компонента – локальные и общие. Первые воздействуют на отдельные камеры сушильной установки, вторые – на всю си-

стему в целом. Выходные параметры, подлежащие обязательному контролю, могут принадлежать разнообразным элементам сушильного оборудования. При этом идентификация их параметров может запаздывать по сравнению с используемыми управляющими воздействиями, следовательно, применяемое в установке управляющее устройство должно синтезировать соответствующие управляющие воздействия, учитывая вероятные флуктуации от заданных режимов функционирования. Это в первую очередь связано с необходимостью достижения базовых индикаторов эффективности работы сушильных установок: заданной производительности сушильного процесса и надлежащего качества выпускаемой продукции.

Постановка задачи управления процессом сушки. Сформулируем задачу управления технологическим процессом сушки. Допустим, имеется объект управления – установка вальце-ленточного типа для сушки пастообразного красного типографского красителя. Конструктивно она разделена на камеры (секции). Число камер у различных сушильных установок в цехе может отличаться. При этом они разработаны таким образом, чтобы специфические участки кинетической кривой процесса сушки отвечали отдельным камерам сушильной установки. В камерах на протяжении всей сушильной установки устанавливаются скребковые и продуктовые пластинчатые транспортеры. Для нагрева и движения сушильного агента (воздуха) в состав секций включены циркуляционные вентиляторы, сбросные шиберы паровые калориферы и воздухозаборные окна. В камерах обеспечивается перекрестный ток. Пастообразный материал, проходя через формовочные вальцы, помещается на ленту продуктового транспортера, который движется вдоль всех камер сушильной установки [1].

Для ускорения процесса сушки в первой секции может быть предусмотрено устройство для перемешивания высушиваемого материала (ворошитель), выведение отработанного воздуха через сбросные задвижки-шиберы обеспечивает вытяжной вентилятор. Согласно кинетическим кривым технологического процесса идентифицируются камеры (лимитирующие секции) n и $n+1$ с максимальным количеством влаги, которое требуется удалить [1]. Для формализованного описания постановки задачи необходимо определить оператор:

$$f: U \times X \times H \rightarrow Y. \quad (1)$$

При разнообразных ситуациях функционирования:

$$H = \{h_l(\cdot), l = \overline{1, L}\}, \quad (2)$$

и в зависимости от численных характеристик возмущающих $\bar{x} = (x_1, \dots, x_p)^T$ и управляющих $\bar{u} = (u_1, \dots, u_D)^T$ воздействий, оператор (1) позволяет идентифицировать вектор выходных переменных $\bar{y} = (y_1, \dots, y_G)^T$. В формулах (1) и (2) используются следующие обозначения: U – множество значений управляющих воздействий; X, Y – множества возмущающих воздействий и выходных параметров соответственно; H – множество изменений ситуаций функционирования; L – количество возможных ситуаций; l – номер текущей ситуации. При этом на изменение управляющих воздействий u и значения выходных переменных y устанавливаются следующие ограничения:

$$y_g \in Y_g^{\text{don}}, \quad g = \overline{1, G}; \quad u_d \in U_d^{\text{don}}, \quad d = \overline{1, D}, \quad (3)$$

где $Y_g^{\text{don}}, U_d^{\text{don}}$ – допустимые значения y_g и u_d .

Далее целесообразно назначить критерий оптимальности технологического процесса сушки:

$$Q = F(\Delta Qp, \Delta Pz, \bar{x}, \bar{u}) \rightarrow \min_{\bar{u}}, \quad (4)$$

где ΔPz и ΔQp – количественная характеристика потерь, обусловленных падением производительности процесса и качества конечной продукции соответственно. Задача повышения эффективности управления процессом сушки заключается в идентификации таких u_d^* , при которых с учетом (3) минимизируется функционал (4). Выходными параметрами вектора y выступают влажность материала: φ_k^k (во всей сушильной установке) и φ_i (на выходе всех секций). Во множество H включаются всевозможные траектории $h(\cdot)$ переменных параметров влажности по всей сушильной установке: $h(\cdot) = (\varphi_n, \varphi_{n+1}, \varphi_k^k)$. В роли элемента управления можно задействовать скорость движения ленты продуктового транспортера.

Множество ситуаций функционирования и классы задач управления. Формирование множества возможных ситуаций функционирования при учете характерных особенностей исследуемого технологического процесса выступает ключевой задачей в рамках этапов анализа и синтеза управляющих воздействий. Для идентификации такого множества целесообразен ввод специальных лингвистических переменных применительно к лимитирующим секциям для достижения требуемой влажности готовой продукции.

Введем обозначения для разнообразных значений влажности материала [1]: nnd – в значительной степени меньше приемлемой; nd – меньше приемлемой; d – приемлемая влажность; vd – больше приемлемой; nvd – в значительной степени больше приемлемой.

Также введем обозначения для меры доверия M к достижению надлежащего качества на выходе установки для сушки: n – низкая мера доверия; sr – средняя мера доверия; v – высокая мера доверия. Для описания меры доверия задействованы нечеткие множества, заданные в виде трапециевидных функций принадлежности [3].

Далее для определения состава множества H для каждой лимитирующей секции целесообразно выбрать величины отклонений значений влажности материала от регламентируемых значений. Таким образом можно получить вектор выходных параметров $\vec{y} = (\varphi_{i=n}, \varphi_{i+1=n+1}, m(\varphi_k^k))$ для n -й и $(n+1)$ -й секций. Множество изменений ситуаций функционирования можно задать в виде морфологической таблицы, где каждый элемент $h_i(\cdot) \in H$ имеет три составляющих $h_i(\cdot) = (h_{li}, h_{li+1}, h_{lk})$, две из которых, h_{li}, h_{li+1} , принимают одно из пяти возможных значений, а компонента h_{lk} – одно из трех [1, 4].

$$h_{li} = \begin{cases} h_{li}^{nnd}, & \text{если } y_i < (\bar{y}_i - \delta_i^{(2)}), \\ h_{li}^{nd}, & \text{если } y_i \in [\bar{y}_i - \delta_i^{(2)}, \bar{y}_i - \delta_i^{(1)}], \\ h_{li}^d, & \text{если } y_i \in [\bar{y}_i - \delta_i^{(1)}, \bar{y}_i + \delta_i^{(1)}], \\ h_{li}^{vd}, & \text{если } y_i \in (\bar{y}_i + \delta_i^{(1)}, \bar{y}_i + \delta_i^{(2)}], \\ h_{li}^{nvd}, & \text{если } y_i > (\bar{y}_i + \delta_i^{(2)}) \quad i = n, n+1; \end{cases}$$

$$h_{lk} = \begin{cases} h_{lk}^n, & \text{если } y_k < 0.65, \\ h_{lk}^{sr}, & \text{если } y_k \in [0.65; 0.8], \\ h_{lk}^v, & \text{если } y_k > 0.8, \end{cases} \quad (5)$$

где k – номер конечной секции, $\delta_i^{(1)}, \delta_i^{(2)}$ – отклонения y_i от \bar{y}_i ($\delta_i^{(1)} < \delta_i^{(2)}$).

Согласно выражениям (5) множество H содержит в себе $N = 75$ возможных режима функционирования. Далее приведем множество ситуации функционирования для заданного временного момента (табл. 1). Строки в таблице характеризуют разнообразные ситуации h'_i в секциях, для контролируемой секции представлена мера доверия к достижению требуемого качества материала по завершению технологического процесса [1].

Таблица 1

Множество вероятных ситуаций функционирования

$h'_i(\cdot) \vee h_i(\cdot)$	Состояния		
	$h_{li}(t)$	$h_{li+1}(t)$	$h_{lk}(t)$
$h'_1(\cdot) \vee h_1(\cdot)$	$h_{1,n}^{nnd}$	$h_{1,n+1}^{nnd}$	$h_{1,k}^M$
$h'_2(\cdot) \vee h_2(\cdot)$	$h_{2,n}^{nd}$	$h_{2,n+1}^{nd}$	$h_{2,k}^M$
$h'_3(\cdot) \vee h_3(\cdot)$	$h_{3,n}^d$	$h_{3,n+1}^{nnd}$	$h_{3,k}^M$
$h'_4(\cdot) \vee h_4(\cdot)$	$h_{4,n}^{vd}$	$h_{4,n+1}^{nnd}$	$h_{4,k}^M$
$h'_5(\cdot) \vee h_5(\cdot)$	$h_{5,n}^{nvd}$	$h_{5,n+1}^{nnd}$	$h_{5,k}^M$
...
$h'_{75}(\cdot) \vee h_{75}(\cdot)$	$h_{75,n}^{nvd}$	$h_{75,n+1}^{nvd}$	$h_{75,k}^v$

В случае множества вероятных ситуаций функционирования, которые определяются показателями влажности материала на выходе из двух секций в разные временные отрезки, таблица формируется аналогично. Таким образом, можно выделить пять различных классов задач управления в сушильных установках: индикатор влажности в рассматриваемых секциях принадлежит приемлемому интервалу (класс $K1$); индикатор влажности в рассматриваемых секциях ниже или намного ниже приемлемого уровня (класс $K2$); индикатор влажности в n -й секции выходит за надлежащие пределы, а в $(n+1)$ -й – принадлежит приемлемому уровню (класс $K3$); индикатор влажности в $(n+1)$ -й секции выходит за надлежащие пределы, а в n -й – принадлежит приемлемому уровню (класс $K4$); индикатор влажности материала в обеих секциях выходит за приемлемый уровень (класс $K5$). Для формирования управляющих воздействий в момент времени t также требуются данные о мере доверия к необходимой конечной влажности материала, а также о показателях влажности в рассматриваемых секциях φ_n, φ_{n+1} . Мере доверия можно рассчитать, используя метод Демпстера – Шафера:

$$m(\varphi_k^k) = \text{Alg}_{\text{ДШ}}(\varphi_n, \varphi_{n+1}, \varepsilon), \quad (6)$$

где $\vec{u}(t - \Delta t)$ – значения компонент вектора управления; ε – числовые оценки экспертных знаний [1].

Алгоритм синтеза управляющих воздействий. Формирование поэтапной процедуры синтеза управляющих воздействий предполагает идентификацию выходных и входных термов лингвистических пере-

менных, а также их функций принадлежности, задаваемых отдельными кусочно-линейными функциями.

Входным терм-множеством лингвистических переменных выступает пара множеств Φ_n и Φ_{n+1} – влажность пастообразного красного типографского красителя на выходе n -й и $(n+1)$ -й секции соответственно, причем $\Phi_n, \Phi_{n+1} = \{nnd, nd, d, vd, nvd\}$ и получены на базе основании знаний экспертов и/или экспериментов; $M_k^k = \{m, sr, v\}$ – меры доверия получения заданной влажности пастообразного красного типографского красителя на выходе сушильной установки, полученные с учетом мнений экспертов методом Демпстера – Шафера (табл. 2, 3).

На выходе из сушильной установки влажность материала зависит от скорости движения ленты продуктового пластинчатого транспортера. Следовательно,

выходной переменной может выступать необходимое значение изменения скорости движения ленты продуктового транспортера U^{sl} [1]. В табл. 4 представлены функции принадлежности термов выходной лингвистической переменной $U^{sl} = \{spon, pon, o, pov, spov\}$. В состав множества U^{sl} входят следующие значения [1]: *spon* – насколько необходимо значительно увеличить скорость движения ленты продуктового транспортера; *pov* – насколько требуется повысить скорость движения ленты транспортера; *o* – изменений скорости движения ленты продуктового транспортера не требуется; *pon* – насколько требуется снизить скорость движения ленты транспортера; *spon* – насколько необходимо значительно понизить скорость ленты транспортера.

Таблица 2

Функции принадлежности термов Φ_n и Φ_{n+1}

№	Условные обозначения термов	Функция принадлежности Φ_n	Функция принадлежности Φ_{n+1}
1	<i>nnd</i>	$1/0+1/17,5+0/22,5$	$1/0+1/5+0/7$
2	<i>nd</i>	$0/17,5+1/22,5+1/27,5+0/32,5$	$0/5+1/7+1/9+0/11$
3	<i>d</i>	$0/27,5+1/32,5+1/37,5+0/42,5$	$0/9+1/11+1/13+0/15$
4	<i>vd</i>	$0/37,5+1/42,5+1/47,5+0/52,5$	$0/13+1/15+1/17+0/19$
5	<i>nvd</i>	$0/47,5+1/52,5+1/100$	$0/17+1/19+1/100$

Таблица 3

Функции принадлежности термов M_k^k

№	Условные обозначения термов переменной M_k^k	Функция принадлежности
1	<i>n</i>	$1/0+1/0,575+0/0,675$
2	<i>sr</i>	$0/0,575+1/0,675+1/0,725+0/0,825$
3	<i>v</i>	$0/0,725+1/0,825+1/1$

Таблица 4

Функции принадлежности термов лингвистической переменной U^{sl}

№	Условные обозначения термов переменной U^{sl}	Функция принадлежности
1	<i>spon</i>	$1/-0,3+1/-0,2+0/-0,17$
2	<i>pon</i>	$0/-0,2+1/-0,17+1/-0,07+0/-0,04$
3	<i>o</i>	$0/-0,07+1/-0,04+1/0,04+0/0,07$
4	<i>pov</i>	$0/0,04+1/0,07+1/0,17+0/0,2$
5	<i>spov</i>	$0/0,17+1/0,2+1/0,3$

Алгоритмы управления содержат систему продукционных правил, которые формируются исходя из множества H , лингвистических переменных и класса задачи управления. При этом при синтезе управляющих воздействий происходит идентификация подмножества вероятных ситуаций функционирования на базе ранее полученных данных, а также определенного сценария управления.

При этом в зависимости от значений элементов множеств H возникает необходимость в решении следующих задач [1]:

1. Множество H принадлежит классу $K1$. Управляющие воздействия неизменны, режим работы сохраняется.

2. Множество H принадлежит классу $K2$. Возникает необходимость в решении задачи повышения производительности при ограничении на качество конечного материала.

3. Элемент множества H принадлежит классу $K3$. Возникает необходимость в решении задачи управления для n -й секции.

4. Элемент множества H принадлежит классу $K4$. Возникает необходимость в решении задачи управления для $(n+1)$ -й секции.

5. Если элемент множества H принадлежит классу $K5$, решаются задачи управления режимами одновременно для двух камер.

При решении задачи управления, формализованно описанной выражениями (1)–(5), целесообразно провести следующие процедуры [5]:

1. Введение нечеткости для объясняющих лингвистических переменных.

2. Получение нечетких заключений (нечетких выводов) о надлежащем управлении объектом на основе нечетких условий или предпосылок с использованием продукционных правил, зависящих от класса задачи управления.

3. Формирование из нечетких множеств для термов выходной лингвистической переменной унифицированного нечеткого множества (аккумуляция).

4. Преобразование нечеткого множества выходной лингвистической переменной в численные значения изменения скорости движения ленты пластинчатого продуктового транспортера. Данное преобразование можно осуществлять тремя методами: центра тяжести, медианы и первого максимума. Таким образом определяется множество значений управляющих воздействий $\{\Delta u_1^{sl}, \Delta u_2^{sl}, \Delta u_3^{sl}\}$.

5. Формирование интервала допустимого изменения управляющих воздействий

U_{oon}^{sl} . Далее для данного интервала ищется оптимальное значение $(\Delta u_i^{sl})^*$, при котором производится минимизация потерь от падения производительности сушильной установки и качества готовой продукции:

$$Q = c_1(a_0 + a_1 \tilde{u}_o^{sl}) + c_2(b_0 + b_1(\tilde{u}_o^{sl})^2) \rightarrow \min_{u_o^{sl} \in U_{oon}^{sl}} \quad (7)$$

Результаты исследования и их обсуждение

Приведем пример идентификации скорости движения ленты продуктового пластинчатого транспортера сушильной установки. Допустим скорость $\tilde{u}_o^{sl} = 3,5$ м/ч. В данном случае влажность пастообразного красного типографского красителя (согласно экспертному мнению) будет равна $\varphi_n = 43\%$ в n -й секции, что можно считать удовлетворительным результатом, а влажность в $(n+1)$ -й камере будет равна $\varphi_{n+1} = 23\%$, что является плохим результатом сушки [1]. Мера доверия достижению требуемой влажности на выходе сушильной установки, рассчитанная согласно модели (6), равна 0,123. Таким образом изложенная выше задача принадлежит к классу задач $K5$. Продукционные правила модели примут следующий вид [1]:

Если $\Phi = vd$ и $\Phi_{n+1} = nvd$ и $M_k^k = M$, тогда $U^{sl} = spon \rightarrow (0,9)$.

Если $\Phi = d$ и $\Phi_{n+1} = nvd$ и $M_k^k = M$, тогда $U^{sl} = spon \rightarrow (0,1)$.

Согласно выражению (7) $(\Delta u_i^{sl})^* = -0,24$ – значение, на которое требуется поменять скорость движения ленты продуктового транспортера. Таким образом, новая скорость движения составит $\tilde{u}_o^{sl} = 3,26$ м/ч.

В результате снижения скорости движения пастообразный красный типографский краситель приобретет новые значения влажности в соответствующих секциях: $\varphi_{n=2}^k = 37\%$ и $\varphi_{n+1=3}^k = 12\%$. Данные значения, согласно экспертному мнению, можно отнести к хорошим [1]. При таких величинах влажности мера доверия на выходе установки изменится и составит $m(\varphi_k^k) = 0,942$. Теперь задача относится к классу $K1$ и продукционное правило примет вид

Если $\Phi_n = d$ и $\Phi_{n+1} = d$ и $M_k^k = v$, тогда $U^{sl} = o$,

В рамках новой задачи скорость движения ленты продуктового транспортера \tilde{u}_o^{sl} осталась неизменной – 3,26 м/ч. В результате решения задачи управления, влажность красного типографского красителя на выходе сушильной установки $\varphi_{k=5}^k$ снизилась с 1,77% до 0,35% [1].

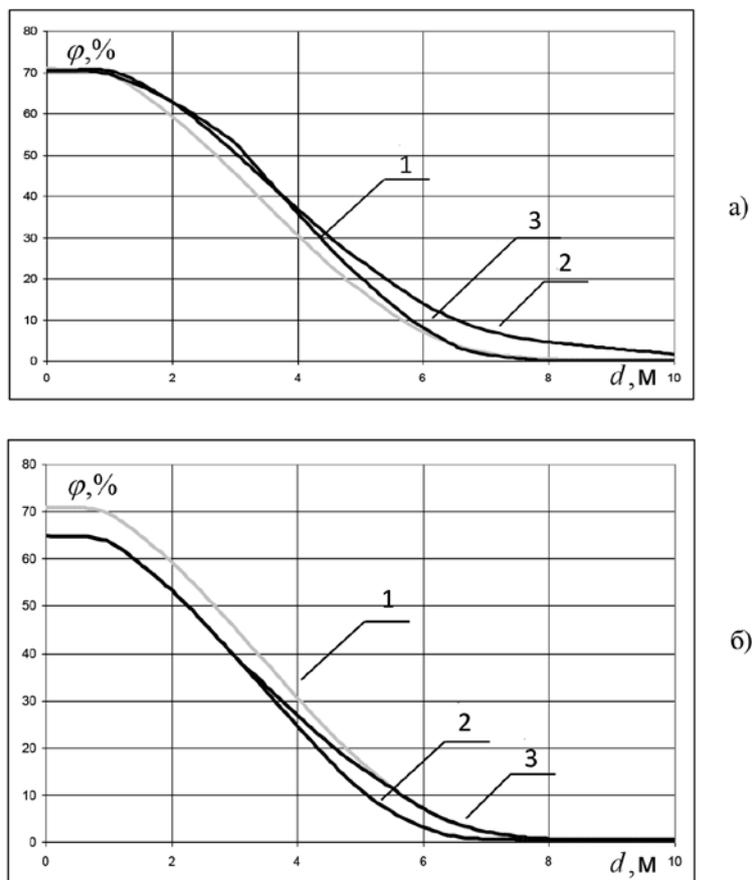


Рис. 1. Кинетические кривые изменения значения показателя влажности красного типографского красителя в условиях: а) снижения скорости движения ленты продуктового транспортера; б) повышения скорости движения ленты продуктового транспортера (1 – идеальная кинетическая кривая, 2 – без применения управления, 3 – с применением управления)

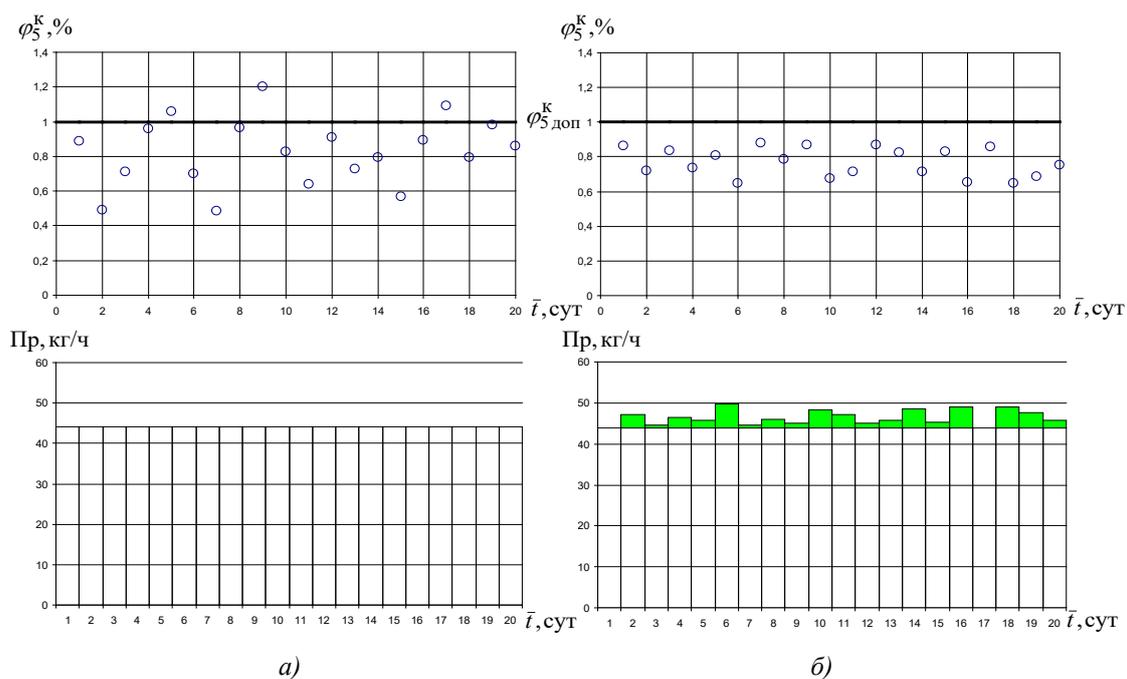


Рис. 2. Показатели технологического процесса сушки: а) без ИСУ; б) с ИСУ

Заключение

На рис. 1, 2 даны кинетические кривые изменения значения индикатора влажности красного типографского красителя в условиях повышения и снижения скорости конвейера с применением разработанной ИСУ [1].

На рис. 2 приведены результаты имитационного моделирования процессов сушки в рамках работы ИУС, даны значения показателя влажности красного типографского красителя на выходе вальце-ленточной сушильной установки и производительности процесса сушки без задействования ИСУ (а) и с ее использованием (б).

Использование предложенной интеллектуальной информационно-управляющей системы в вальце-ленточных сушильных аппаратах позволит повысить производительность процессов сушки на 5% и обеспечить рост вероятности выхода качественной продукции до 0,98.

Список литературы

1. Артемова С.В., Артемов А.А., Каменская М.А. Методология проектирования интеллектуальной информационно-управляющей системы тепло-технологическими аппаратами: монография. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВО «ГТТУ», 2016. 196 с.
2. Муромцев Д.Ю., Грибков А.Н., Шамкин В.Н., Тюрин И.В. Особенности реализации интеллектуальных систем энергосберегающего управления энергоемкими объектами // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2019. № 12. С. 43–49.
3. Рязанов И.Г., Зырянов Ю.Т., Наумова А.Ю. Техническое диагностирование информационно-измерительной и управляющей системы с применением нейросетевых технологий // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2019. № 5. С. 37–46.
4. Грибков А.Н., Залукаева Н.Ю. Информационная модель процесса транспортировки биотоплива от производителей к потребителям на множестве состояний функционирования // Южно-Сибирский научный вестник. 2021. № 3 (37). С. 19–25.
5. Белоусов О.А., Рязанов Е.В., Колмыкова А.С., Дякин А.И. Применение алгоритмов нечеткой логики в системе управления диаграммообразующим устройством гибридной зеркальной антенны // Программные продукты и системы. 2018. Т. 31. № 4. С. 757–762.