

УДК 631.365.22

## ОБОСНОВАНИЕ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗЕРНА ДЛЯ СУШИЛОК ШАХТНОГО ТИПА

<sup>1,2</sup>Андрианов Н.М., <sup>2</sup>Мэй Шуньчи, <sup>2</sup>Чен Джен, <sup>2</sup>Ли Джен

<sup>1</sup>Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого,

Великий Новгород, e-mail: novsu@novsu.ru;

<sup>2</sup>Уханьский текстильный университет, Ухань, Китай, e-mail: wb@wtu.edu.cn

На основе экспериментальных данных выполнен анализ динамики процессов регулирования температуры зерна в шахтных сушилках. Подтверждено, что сушилка стохастическая динамическая система. Колебания начальной влажности зерна вызывают значительные колебания его температуры и влажности в сушилке. Период колебаний сопоставим с экспозицией сушки. Связь процессов изменения влажности и температуры зерна подтверждена коэффициентами взаимной корреляции. Они принимают как положительные, так и отрицательные значения в зависимости от влажности зерна. Наибольшее и однозначное влияние на температуру зерна оказывает температура теплоносителя, а на влажность – экспозиция сушки. Их нужно использовать как управляющие воздействия. Экспозиция неоднозначно влияет на температуру зерна, поэтому ее нельзя использовать для управления температурой. Структура передаточных функций и статические коэффициенты передачи по высоте сушилки переменны. Коэффициенты передачи зависят от режима сушки и параметров зерна. Раскрыт характер взаимной связи процессов изменения температуры и влажности зерна в процессе регулирования его температуры. Это позволило обосновать рациональные параметры передаточной функции, обеспечивающей высокое быстродействие системы. Подтверждено, что нагрев зерна в сушилке неодинаков, а зона с максимальной температурой непрерывно перемещается (дрейфует). Это обуславливает необходимость применения многоточечной системы контроля с поисковым алгоритмом обнаружения зоны максимального нагрева. Для лучшей стабилизации режимов предложена система регулирования температуры зерна. Ее использование обеспечивает более интенсивную сушку.

**Ключевые слова:** зерносушилка шахтная, режимы сушки, регулирование, оптимизация

## RATIONALE OF SYSTEM REGULATION OF TEMPERATURE GRAIN FOR DRYERS OF MINE TYPE

<sup>1,2</sup>Andrianov N.M., <sup>2</sup>Mei Shunqi, <sup>2</sup>Chen Zhen, <sup>2</sup>Li Zhen

<sup>1</sup>Novgorod State University, Veliky Novgorod, e-mail: novsu@novsu.ru;

<sup>2</sup>Wuhan Textile University, Wuhan, China, e-mail: wb@wtu.edu.cn

Based on experimental data performed the analysis of the dynamics of the processes of regulation of temperature of grain in the shaft drier. It is confirmed that the dryer is a stochastic dynamic system. The initial fluctuations of grain humidity cause significant fluctuations of temperature and humidity of grain in the dryer. Period of oscillations is comparable with the exposition of drying. The interplay between changes of grain humidity and of grain temperature confirmed the correlation coefficients. They take both positive and negative values, depending on the humidity content of grain. The greatest and unambiguous influence on the temperature of grain has the temperature of heat carrier, and on the humidity of grain has the drying exposure. They should be used as the control variable. The exposition of drying has not unambiguous influence on the temperature of grain, so she cannot be used to Regulation the temperature. Structures of the transfer functions and static coefficients of transmission along the height of the dryer is variables. Transfer coefficients depend on the mode drying and parameters of grain. The nature of interrelationship of processes of changing the temperature and humidity of grain during the regulating of its temperature is disclosed. This helped justify the rational parameters of transfer function, which provides high speed of the system. Confirmed that the heating of grain in dryer is uneven, and the zone with a maximum its temperature of continuously is moving (drifting). This necessitates the use of a multipoint control system with a search algorithm for the detection zone of maximum heating. For better stabilization regimes, is offered system of regulation of temperature of grain. Its use provides a more intensive drying.

**Keywords:** the dryer shaft, drying regimes, regulation, optimization

Сушка зерна проводится при жестком ограничении его нагрева. В шахтных сушилках, кроме абсолютных значений допустимого нагрева, дополнительно задаются ограничения на разброс этих значений во времени и пространстве, как правило, в ее нижнем горизонтальном сечении [15]. Это позволяет учесть стохастический характер изменения параметров зернового вороха, поступающего на сушку, и неоднородность условий его обработки в сушилке. Однако

практика показывает, что указанные требования выполнить сложно.

Один из путей интенсификации сушки повышение надежности оперативного контроля температуры зерна, что позволяет с меньшей погрешностью осуществить ее регулирование и приблизить режимы к предельно допустимым. Надежность обеспечивается не только точностью измерительного оборудования, но и оптимальным размещением датчиков, применением рациональных

алгоритмов их опроса и т.п. Решение этих задач требует учета множества технологических особенностей сушильных камер, однако исчерпывающей информации об оптимальной структуре системы пока не имеется [14].

**Цель исследования.** Изучение динамики процессов нагрева зерна в камере сушки. Разработка системы регулирования температуры зерна с учетом технологических особенностей рабочего процесса.

### Материал и методы исследования

Анализ процессов выполнен на основе экспериментальных данных, полученных в результате исследования шахтной сушилки СЗШ-8, с использованием методов статистической динамики и автоматического регулирования.

### Результаты исследования и их обсуждение

Камера сушки как объект управления температурой зерна – сложная динамическая система [1–9], входные и выходные переменные, которой взаимосвязаны (рис. 1). Состояние процесса определяется температурой  $\vartheta_3(t)$  и влажностью  $W(t)$  зерна, их начальные значения  $\vartheta_{30}(t)$  и  $W_0(t)$  определяют условия сушки, а температура теплоносителя  $\vartheta_T(t)$  и экспозиция  $\omega(t)$  – режим обработки.

Статистические характеристики процессов (табл. 1) подтверждают, что входные переменные  $\vartheta_{30}(t)$  и  $W_0(t)$  в течение времени изменяются стохастически, что возбуждает колебания выходных переменных  $\vartheta_3(t)$  и  $W(t)$  в интервале, превышающем агротехнический допуск [2–5]. Период колебаний существенных частот сопоставим с экспозицией.

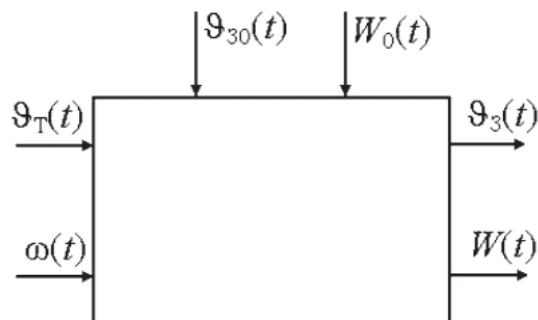


Рис. 1. Структурная схема сушильной камеры

Таблица 1

Оценки характеристик случайных функций

Показатель	Среднее значение	Среднеквадратичное отклонение
Влажность, %:		
на входе $W_0(t)$	15,2...33,6	0,70...1,70
на выходе $W(t)$	13,5...29,8	0,14...2,60
Температура, °С:		
на входе $\vartheta_{30}(t)$	9,9...18,1	0,40...2,50
на выходе $\vartheta_3(t)$	21,1...31,0	0,23...5,30

Нормированные взаимные корреляционные функции процессов по каналам преобразования возмущающих воздействий (рис. 2) подтверждают существование между ними тесной корреляционной связи, сдвиг максимума которой практически равен экспозиции.

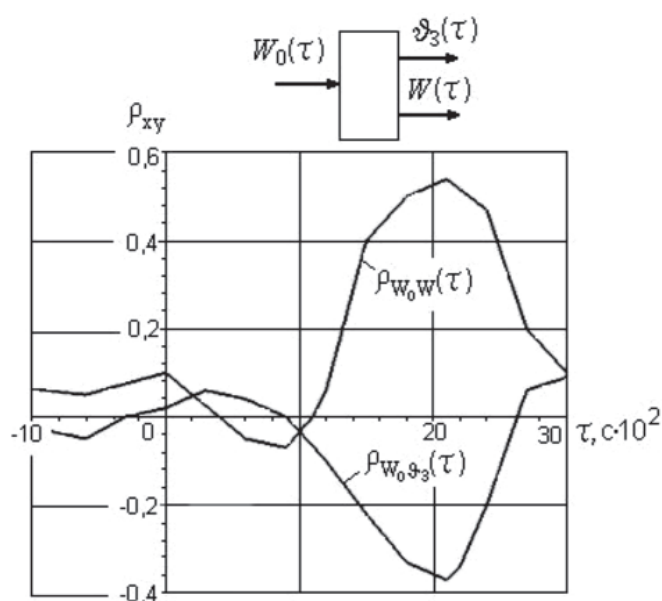


Рис. 2. Нормированные взаимные корреляционные функции процессов  $W_0(t) - \vartheta_3(t)$  и  $W_0(t) - W(t)$

Коэффициенты взаимной корреляции процессов  $W_0(t) - \vartheta_3(t)$  и  $W(t) - \vartheta_3(t)$  в зависимости от режима сушки переменны и принимают как положительные, так и отрицательные значения, табл. 2. При низких влажностях зерна ( $W_0 < 20\%$ ) коэффициенты отрицательны, а при высоких – положительные.

**Таблица 2**  
Коэффициенты взаимной корреляции процессов

Наименование процессов	Диапазон изменения
$W_0(t) - \vartheta_3(t)$	-0,48...0,32
$W_0(t) - W(t)$	0,37...0,61
$W(t) - \vartheta_3(t)$	-0,77...0,39

Корреляционной связи процессов  $\vartheta_{30}(t) - \vartheta_3(t)$  не обнаружено, но обнаружена тесная связь процессов  $W_0(t) - \vartheta_3(t)$ , чем подтверждается, что основным возмущающим воздействием сушки являются колебания  $W_0(t)$ .

Наибольшие значения коэффициента корреляции процессов  $W(t) - \vartheta_3(t)$  соответ-

ствуют зерновому слою с низкой влажностью ( $W < 16\%$ ), что подтверждает возможность косвенной оценки его влажности по температуре нагрева. Это можно использовать в системах для принятия оперативного решения об окончании сушки.

Наибольшее и однозначное влияние на  $\vartheta_3$  оказывает температура теплоносителя  $\vartheta_T$ , а на влажность  $W$  – экспозиция  $\omega$  [5–9], значение которой определяется частотой колебаний выгрузного аппарата. Изменение  $\omega$  неоднозначно влияет на  $\vartheta_3$  (рис. 3), из чего следует, что ее нельзя использовать для управления температурой  $\vartheta_3$ . Таким образом, в системе  $\vartheta_T$  должна использоваться для управления температурой зерна, а  $\omega$  – для управления его влажностью.

При постоянной температуре теплоносителя  $\vartheta_T$  изменение  $W_0$  и  $\omega$  ведут к изменению температуры зерна (рис. 3). Это подтверждает, что стабилизация  $\vartheta_T$  не обеспечивает стабилизации температуры зерна. Для повышения качества регулирования в системе должен быть реализован принцип стабилизации не температуры, а количества теплоты, подаваемой в сушильную камеру теплоносителем [6–9, 12].

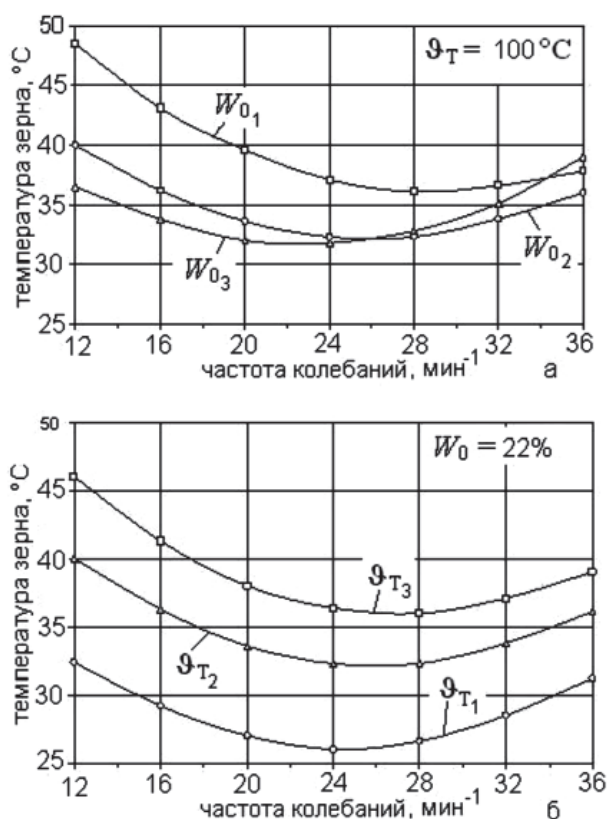


Рис. 3. Изменение температуры зерна в зависимости от частоты колебаний выгрузного аппарата на выходе камеры сушки:

а – при  $W_{01} = 18\%$ ,  $W_{02} = 22\%$ ,  $W_{03} = 26\%$ ; б – при  $\vartheta_{T1} = 70^\circ\text{C}$ ,  $\vartheta_{T2} = 100^\circ\text{C}$ ,  $\vartheta_{T3} = 130^\circ\text{C}$

Динамические свойства сушиллки функциями, что обусловлено качественными отличиями протекающих в них описываются разными передаточными процессами [7].

Таблица 3

Передаточные функции и статические коэффициенты передачи сушиллки СЗШ-8

Канал передачи	Статический коэффициент передачи		Передаточная функция	
	Единица измерения	Пределы изменения	2–4 ряд коробов	6–15 ряд коробов
$\vartheta_T - \vartheta_3$	°C/°C	0,035–0,351	$\frac{K_{\vartheta_T \vartheta_3} \cdot e^{-\tau_{01} \cdot p}}{T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1}$	$\frac{K_{\vartheta_T \vartheta_3} \cdot e^{-\tau_{01} \cdot p}}{T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1}$
$\omega - \vartheta_3$	°C/мин <sup>-1</sup>	-1,13–0,785	$\frac{K_{\omega \vartheta_3}}{T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1}$	$\frac{K_{\omega \vartheta_3} (T'' \cdot p^2 + T' \cdot p + 1)}{T_3^3 \cdot p^3 + T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1}$
$W_0 - \vartheta_3$	°C/%	-1,769–1,009	$K_{W_0 \vartheta_3} \cdot e^{-\tau p}$	$K_{W_0 \vartheta_3} \cdot e^{-\tau p}$

Изменчивость по высоте сушиллки значений параметров передаточных функций (табл. 4) характеризует её как распределенную динамическую систему, постоянные времени которой возрастают в направлении увеличения ряда коробов. Установлено, что большим значениям  $W_0$  и  $\omega$  соответствуют меньшие значения постоянных времени, интервал изменения которых достигает 20%. Это подтверждает то, что слой более влажного и быстро перемещающегося зерна нагревается быстрее.

Таблица 4

Постоянные времени передаточных функций

Постоянная времени	Пределы изменения по каналам передачи, мин	
	$\vartheta_T - \vartheta_3$	$\omega - \vartheta_3$
$T_1$	10,06–19,53	-25,83–(-14,24)
$T_2$	4,49–9,23	7,69–14,39
$T_3$	–	-7,98–(-4,61)
$T'$	–	-2,19–68,21
$T''$	–	69,14–46,12
$\tau_0$	3,7–5,1	–

Процессы нагрева и изменения влажности зерна в сушиллке взаимосвязаны, что позволяет интерпретировать их протекание в переходном режиме, рассматривая два периода (рис. 4). Первый характеризуется интенсивным повышением температуры  $\vartheta_3$  зерна. Скорость изменения температуры в этом периоде определяется только тепло-

вой инерционностью зернового слоя, так как изменение его влажности из-за большой инерционности невелико и практически не влияет на приращение температуры. Продолжительность периода составляет 20–25 минут.

Во втором периоде начинается интенсивное изменение влажности, что приводит к постепенному перераспределению составляющих теплового баланса процесса сушки. Доля теплоты, затрачиваемая на испарение влаги, возрастает, поэтому процесс нагрева зерна существенно замедляется. Дальнейшее изменение температуры зерна полностью определяется инерционностью поля его влагосодержания и характером взаимной связи процессов тепло- и массопереноса. Поэтому время  $\tau$  окончания переходных процессов по обоим каналам практически одинаково и определяется экспозицией сушки.

Отличием является только то, что причиной изменения температуры зерна после скачкообразного увеличения  $\omega$  (рис. 4, б) является резкое изменение состояния подвижного зернового слоя. С увеличением  $\omega$  слой разуплотняется, это снижает его аэродинамическое сопротивление и вызывает увеличение подачи теплоносителя и теплоты в камеру сушки. Вследствие этого увеличивается его температура [6–9].

Для разработки системы важно правильно оценить инерционные свойства сушиллки. Расчет регулятора по завышенным данным ведет к снижению быстродействия системы, а необоснованное занижение – к потере устойчивости. Применительно к каналу регулирования температуры зерна ( $\vartheta_T - \vartheta_3$ ) обоснованным, с позиций максимального быстродействия системы, является выбор

постоянных времени передаточной функции на основе информации о затухании переходных процессов, обусловленных тепловой инерционностью зернового слоя. Из

полученных данных постоянные времени можно принять равными  $T_1 = 4,9-6,1$  мин,  $T_2 = 2,3-3,1$  мин. Причем их меньшие значения соответствуют большим значениям  $W$  и  $\omega$ .

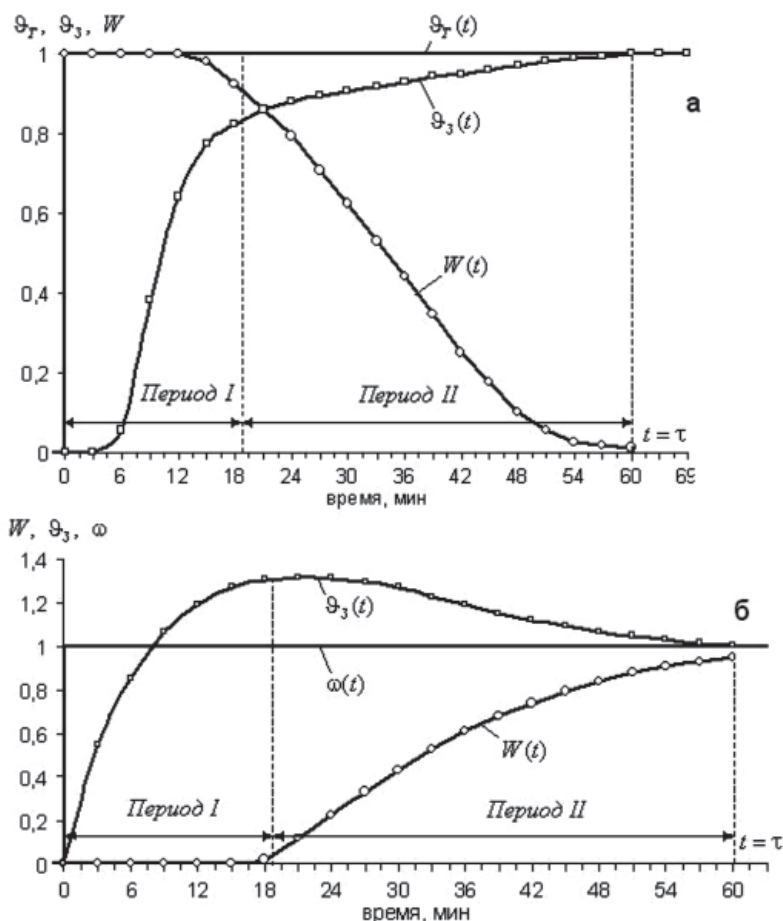


Рис. 4. Переходные процессы, возбужденные скачкообразным изменением: температуры  $\vartheta_T$  теплоносителя (а); частоты  $\omega$  колебаний выпускного аппарата (б)

Неравномерность влажности и температуры зерна в нижнем горизонтальном сечении сушилки оценили по их отклонениям от средних значений. Разброс влажности в отдельных точках сечения достигает  $\pm 2,5\%$ , а температуры –  $\pm 7^\circ\text{C}$ , что превышает допуски, задаваемые агротребованиями. Неравномерный нагрев зерна обуславливает необходимость построения многоточечной системы контроля его температуры.

Неоднозначность приращения температуры зерна при изменении  $W$  и  $\omega$  (см. табл. 2, 3 и рис. 3) подтверждает, что в горизонтальном сечении невозможно заранее определить место, в котором на всех режимах наблюдался бы максимальный нагрев зерна. Так, при низких влажностях зерна ( $W_0 < 18\%$ ) его больший нагрев наблюдается в местах с меньшими скоростями перемещения зерна, а при высоких ( $W_0 > 20\%$ )

наоборот – в местах с большими скоростями перемещения. В условиях непрерывного изменения влажности зерна, поступающего в сушилку, будут происходить непрерывные изменения температуры зерна в различных точках ее горизонтальных сечений. Это обстоятельство обуславливает необходимость применения поисковых алгоритмов обнаружения зон максимального нагрева зерна.

С учетом полученных данных разработана система [10–13] (рис. 5). Она содержит камеру сушки 1, в которой экспозиция регулируется выгрузным аппаратом 2. Теплоноситель из теплогенератора 3 подается в камеру сушки через диффузор 4, а удаляется из нее вентилятором через диффузор 5. Изменение температуры теплоносителя осуществляется регулирующим органом 6, а изменение скорости газа в зерновом слое – регулирующим органом 7.



Стабилизация тепловых режимов осуществляется двумя независимыми контурами – регулирования температуры и скорости теплоносителя. Каждый из контуров содержит датчик 12 (13), задатчик 14 (15) и элемент сравнения 16 (17), который через регулирующий прибор 18 (19) соединен с регулирующим органом 6 (7). Одновременная стабилизация температуры и массовой подачи теплоносителя обеспечивает стабилизацию подачи теплоты.

Система контроля температуры зерна включает датчики 8, блок селекции 9, выделяющий максимальный сигнал, задатчик 10 и элемент сравнения 11, сигнал рассогласования которого через корректирующий элемент 20 изменяет задание подчиненного контура регулирования температуры теплоносителя. Система обеспечивает распределенный контроль и адаптивное регулирование температуры зерна, что повышает точность поддержания тепловых режимов и интенсифицирует сушку.

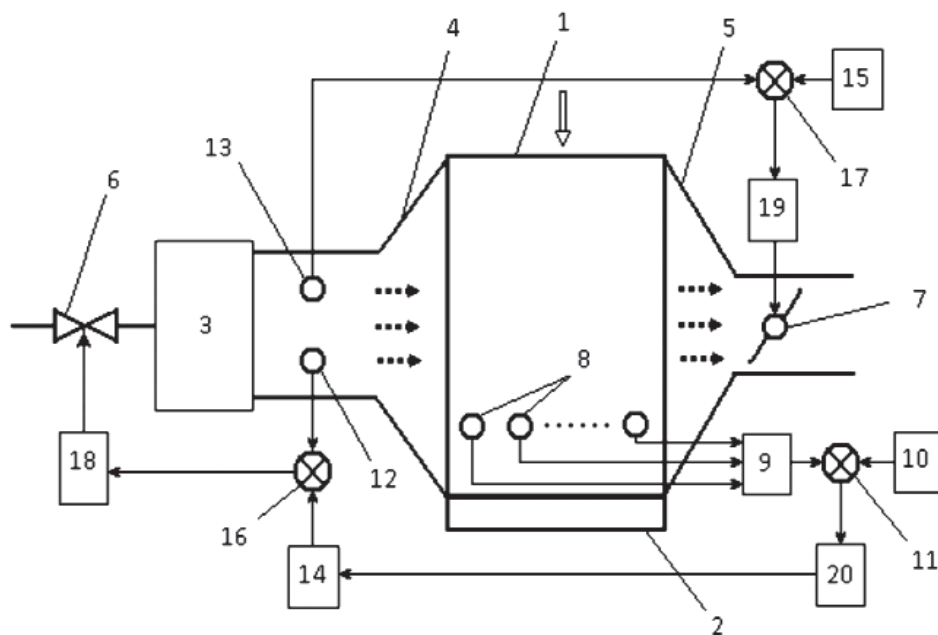


Рис. 5. Схема системы регулирования температуры зерна (обозначения в тексте):  
 ⇨ – направление движения зерна; ●⇨ – направление движения теплоносителя

### Заключение

Полученные данные характеризуют сушку как стохастическую, распределенную, нелинейную динамическую систему с переменной структурой по высоте. Это многосвязный объект управления, параметры передаточных функций которого зависят от характеристик зерна и режимов его обработки, а значения постоянных времени подтверждают значительную инерционность. Основным возмущающим воздействием рабочего процесса являются колебания влажности зернового вороха, которые вызывают колебания температуры и влажности зерна в камере сушки, превышающие агротехнический допуск. Неоднородный нагрев зерна в камере сушки и непрерывный дрейф зоны максимального нагрева обуславливают необходимость применения многоточечной, поисковой системы контроля. Регулирование температуры зерна

в системе необходимо осуществлять изменением количества теплоты, подаваемой в сушилку, а регулирование влагосодержания – изменением экспозиции сушки. Регулирование температуры зерна изменением экспозиции невозможно из-за неоднозначности влияния скорости перемещения зернового слоя на его температуру.

### Список литературы

1. Андрианов Н. М. Как улучшить сушку зерна // Сельский механизатор. – 2008. – № 9. – С. 7,20.
2. Андрианов Н. М. Особенности работы зерновых сушилок // Техника в сельском хозяйстве. – 2006. – № 4. – С. 9–12.
3. Андрианов Н. М. Повышение эффективности функционирования зерновых сушилок // Современные наукоемкие технологии. – 2004. – № 2. – С. 175–177.
4. Андрианов Н. М. Совершенствование технологического процесса в шахтной зерносушилке // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2004. – № 7. – С. 7–9.
5. Андрианов Н. М. Контроль и регулирование температуры зерна в шахтных сушилках // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – № 8. – С. 9–13.

6. Андрианов Н. М. Регулирование тепловых режимов в сушилках с гравитационным движущимся слоем // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – № 4. – С. 30–33.

7. Андрианов Н.М. Исследование шахтной зерносушилки как объекта управления // Успехи современного естествознания. – 2004. – № 9. – С. 86–91.

8. Андрианов Н.М. Регулирование тепловых режимов в сушилках с гравитационным движущимся слоем // Материалы 81 международной научно-практической конференции «Man-Made World as an Instrument of Life Support and Creative Self-Expression of Mankind» (London, May 13 – May 20, 2014): Published by IASHE, London, 2014. – Н. 60–65.

9. Андрианов Н. М. Обоснование системы стабилизации потока теплоты для зерносушилок шахтного типа // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 8 (часть 7). – С. 1518–1523.

10. Андрианов Н. М. Устройство для контроля и регулирования температуры // Авторское свидетельство SU 1425622. 1988, Бюл. № 35.

11. Андрианов Н. М. Способ автоматического регулирования процесса сушки зерна в шахтной зерносушилке и устройство для его осуществления // Патент RU 2018076. 1994, Бюл. № 15.

12. Андрианов Н. М. Способ автоматического регулирования процесса сушки зерна и устройство для его осуществления // Патент RU 2135917. 1999, Бюл. № 24.

13. Андрианов Н. М. Способ автоматического регулирования процесса сушки зерна и устройство для его осуществления // Патент RU 2157958. 2000, Бюл. № 29.

14. Гуляев Г.А. Структура и основные параметры автоматической системы контроля температуры нагрева зерна в шахтной сушилке // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1979. – № 8. – С. 20–22.

15. Чижиков А. Г. Операционная технология послеуборочной обработки и хранения зерна (в Нечернозёмной зоне). – М.: Россельхозиздат, 1981. – 191 с.

5. Andrianov N.M. Kontrol' i regulirovanie temperatury zerna v shahtnyh sushilках // Traktory i sel'hozmashiny. 2014. no. 8. pp. 9–13.

6. Andrianov N.M. Regulirovanie teplovyh rezhimov v sushilках s gravitacionnym dvizhushhimsja slo-em // Traktory i sel'hozmashiny. 2014. no. 4. pp. 30–33.

7. Andrianov N.M. Issledovanie shahtnoj zernosushilki kak objekta upravlenija // Uspеhi sovremen-nogo estestvoznanija. 2004. no. 9. pp. 86–91.

8. Andrianov N.M. Regulirovanie teplovyh rezhimov v sushilках s gravitacionnym dvizhushhimsja slo-em // Materialy 81 mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Man-Made World as AN Instrument of Life Support and Creative Self-Expression of Mankind» (London, May 13 May 20, 2014): Published by IASHE, London, 2014. pp. 60–65.

9. Andrianov N.M. Obosnovanie sistemy stabilizacii potoka teploty dlja zernosushilok shahtnogo tipa // Fundamental'nye issledovanija. 2014. no. 8 (chast' 7). pp. 1518–1523.

10. Andrianov N.M. Kak uluchshit' sushku zerna // Sel'skij mehanizator. 2008. no. 9. pp. 7,20.

11. Andrianov N.M. Sposob avtomaticheskogo regulirovanija processa sushki zerna v shahtnoj zerno-sushilke i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija // Patent RU 2018076. 1994, Bjul. no. 15.

12. Andrianov N.M. Sposob avtomaticheskogo regulirovanija processa sushki zerna i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija // Patent RU 2135917. 1999, Bjul. no. 24.

13. Andrianov N.M. Sposob avtomaticheskogo regulirovanija processa sushki zerna i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija // Patent RU 2157958. 2000, Bjul. no. 29.

14. Guljaev G.A. Struktura i osnovnye parametry avtomaticheskoi sistemy kontrolja temperatury na-greva zerna v shahtnoj sushilke // Mehanizacija i jelektrifikacija sel'skogo hozjajstva. 1979. no. 8. pp. 20–22.

15. Chizhikov A.G. Operacionnaja tehnologija posleu-borochnoj obrabotki i hranenija zerna (v Nechernozjomnoj zone). M.: Rossel'hozizdat, 1981. 191 p.

### References

1. Andrianov N.M. Ustrojstvo dlja kontrolja i regulirovani-ja temperatury // Avtorskoe svidetel'stvo SU 1425622. 1988, Bjul. no. 35.

2. Andrianov N.M. Osobennosti raboty zernovyh sushilok // Tehnika v sel'skom hozjajstve. 2006. no. 4. pp. 9–12.

3. Andrianov N.M. Povyshenie jeffektivnosti funkcionirovanija zernovyh sushilok // Sovremennye naukoemkie tehnologii. 2004. no. 2. pp. 175–177.

4. Andrianov N.M. Sovershenstvovanie tehnologicheskogo processa v shahtnoj zernosushilke // Meha-nizacija i jelektrifikacija sel'skogo hozjajstva. 2004. no. 7. pp. 7–9.

### Рецензенты:

Волхонов М.С., д.т.н., профессор, проректор по учебной работе Костромской государственной сельскохозяйственной академии, Костромская область, п. Караваяво;

Манасян С.К., д.т.н., профессор, зав. кафедрой механизации сельского хозяйства Красноярского государственного аграрного университета, г. Красноярск.

Работа поступила в редакцию 06.10.2014.