DOI: 10.17117/na.2014.02.128

Поступило в редакцию: 24.12.2014

<http://ucom.ru/doc/na.2014.02.128.pdf>

Андрианов Н.М., Мэй Шуньчи, Сюе Юн Исследование шахтной сушилки в условиях нормальной эксплуатации

Andrianov N.M., Mei Shunqi, Xue Yong
Research of shaft dryer in the conditions of normal operation

На основе экспериментальных данных выполнен анализ динамики рабочего процесса в шахтной сушилке. Подтверждено, что сушилка стохастическая динамическая система. Колебания начальной влажности зерна вызывают значительные колебания его температуры и влажности в сушилке. Установлено, что основным возмущающим воздействием процесса сушки являются колебания влажности зерна. Они ведут к низкому качеству процесса сушки. Для лучшей стабилизации режимов предложена система регулирования температуры и влажности зерна. Ее использование обеспечивает более интенсивную сушку

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

Андрианов Николай Михайлович

Доктор технических наук, профессор
Новгородский государственный университет им.
Ярослава Мудрого
г. Великий Новгород, ул. Б. Санкт-Петербургская, 41

Мэй Шуньчи

Кандидат технических наук, декан
Уханьский текстильный университет
Китай, Ухань, Джангхия, Саншайн авеню, 1

Сюе Юн

Кандидат технических наук, доцент
Уханьский текстильный университет
Китай, Ухань, Джангхия, Саншайн авеню, 1

Based on experimental data the analysis of the dynamics of the workflow in the dryer shaft executed. Confirmed that the dryers is a stochastic dynamic system. The initial fluctuations of grain humidity cause significant fluctuations of temperature and humidity of grain in the dryer. They lead to low quality of the drying process. For better stabilization regimes offered system of regulation of temperature and moisture of grain. Its use provides a more intensive drying

Key words: dryer shaft, drying regimes, regulation, identification, optimization

Andrianov Nikolay Mikhailovich

Doctor of Technical Sciences, Professor
Novgorod state University named Yaroslav Mudriy
Veliky Novgorod, Bolshaya Petersburg st., 41

Mei Shunqi

Candidate of Technical Sciences, Dean
Wuhan Textile University
China, Wuhan, Jiangxia, Sunshine Avenue, 1

Xue Yong

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Wuhan Textile University
China, Wuhan, Jiangxia, Sunshine Avenue, 1

Сушилка, как объект управления, сложная динамическая система, входные и выходные переменные, которой взаимосвязаны. Состояние процесса определяется температурой $\vartheta_3(t)$ и влажностью $W(t)$ зерна, их начальные зна-

чения $\vartheta_{30}(t)$ и $W_0(t)$ определяют условия сушки, а температура теплоносителя $\vartheta T(t)$ и экспозиция $\omega(t)$ – режим обработки.

Исследования подтверждают, что выполнить процесс сушки в соответствии с агротехническими требованиями [3-7] сложно. Это вызвано не только колебаниями характеристик потока зернового вороха [1, 2], но и техническими особенностями сушилок, их систем управления и действиями оператора. Идентификация сушилки в условиях нормальной работы позволяет получить достоверную информацию о качестве выполнения рабочего процесса, структуре и взаимной связи процессов ее функционирования. Эта информация необходима для оптимизации сушилок и их систем управления. Исследования выполнены методами статистической динамики в поточной линии, содержащей шахтную зерносушилку СЗШ-16А.

Статистические характеристики переменных состояния процесса сушки (табл. 1 и 2) подтверждают, что входные переменные $\vartheta_{30}(t)$ и $W_0(t)$ в течение времени изменяются стохастически в широких пределах, что возбуждает колебания выходных переменных $\vartheta_3(t)$ и $W(t)$ в интервале, превышающем агротехнический допуск [15].

Таблица 1. Статистические характеристики переменных на входе и выходе сушилки

Опыт	Вид зерна	Разводка выгрузного аппарата, град.	Зона контроля в сушилке	Переменная					
				Температура теплоносителя		Влажность зерна		Температура зерна	
				$m\vartheta T, \text{оС}$	$\sigma\vartheta T, \text{оС}^2$	$mW, \%$	$\sigma W, (\%)^2$	$m\vartheta_3, \text{оС}$	$\sigma\vartheta_3, \text{оС}^2$
1	овес	16,5	на входе	64,6	0,8	33,6	1,7	14,7	2,5
			на выходе	29,9	1,5	25,5	1,2	28,0	1,0
2	овес	16,5	на входе	67,6	0,6	31,3	1,6	18,1	2,5
			на выходе	33,9	1,7	22,7	1,2	30,0	1,1
3	ячмень	22,0	на входе	62,1	0,52	31,1	2,6	10,4	1,0
			на выходе	31,8	3,1	28,8	1,8	26,7	1,7
4	ячмень	15,0	на входе	69,2	0,8	28,4	2,0	9,9	0,4
			на выходе	25,8	2,8	24,1	1,7	25,7	1,8
5	ячмень	15,0	на входе	70,3	0,6	19,8	2,4	11,5	1,0
			на выходе	27,4	2,9	14,5	1,6	31,8	3,6
6	ячмень	21,2	на входе	71,8	1,0	30,5	2,6	13,1	0,8
			на выходе	29,0	1,5	21,7	1,6	27,6	1,8
7	ячмень	17,0	на входе	68,4	1,0	28,3	1,5	12,8	0,8
			на выходе	30,1	1,7	21,0	0,9	25,1	2,7
8	ячмень	19,8	на входе	83,5	0,75	19,8	2,4	10,9	1,6
			на выходе	36,8	2,5	14,5	1,6	26,4	2,3
9	ячмень	22,0	на входе	57,4	0,7	16,4	1,06	12,2	0,7
			на выходе	29,9	3,0	14,3	0,87	24,0	0,8
10	пшеница	30,0	на входе	97,4	0,72	22,3	1,9	16,9	1,6
			на выходе	47,5	2,1	14,3	1,2	37,3	1,7
11	пшеница	25,0	на входе	92,4	0,9	23,8	2,8	20,5	1,2
			на выходе	40,4	2,7	16,9	2,3	41,8	3,4
12	пшеница	22,0	на входе	90,5	0,8	23,3	2,4	18,6	1,1
			на выходе	40,3	2,6	18,6	2,0	36,5	3,1

При изменении температуры теплоносителя $\vartheta T(t)$ в диапазоне 57,4...97,4оС в камере сушки удавалось снизить влажность зерна на 2,1...8,8 %, при этом его нагрев оставался ниже предельно допустимого, что свидетельствует о низкой интенсивности применяемых режимов. Средние расходы теплоносителя в опытах поддерживались в диапазоне 9,9...11,8 м3/с при средне-квадратических отклонениях $\sigma = 0,6...2,7$ (м3/с)². Влагосодержание теплоносителя на выходе из камеры сушки изменялось в диапазоне 36,0...82,3% при $\sigma = 4,6...12,5$ (%)².

Таблица 2. Статистические характеристики переменных в центральном вертикальном сечении камеры сушки

Ряд отводящих коробов	Переменная							
	Влажность зерна		Температура зерна		Температура теплоносителя в подводящем коробе		Температура теплоносителя в отводящем коробе	
	mW, %	σW , (%) ²	m ϑZ , оС	$\sigma \vartheta Z$, оС ²	m $\vartheta T0$, оС	$\sigma \vartheta T$, оС ²	m ϑT , оС	$\sigma \vartheta T$, оС ²
Ячмень «Пиррка». Разводка выгрузного аппарата 15°								
2	19,0	2,4	11,5	1,0	66,9	0,6	16,4	1,2
4	18,8	2,4	18,0	1,7	-	-	-	-
6	18,1	2,1	22,6	2,1	69,1	0,5	26,1	1,9
8	17,1	2,3	24,6	2,3	69,1	0,5	29,4	2,2
9	16,6	2,2	26,6	2,7	-	-	-	-
10	16,1	2,0	28,0	2,6	-	-	-	-
11	15,9	1,9	29,2	2,6	69,4	0,6	34,4	2,4
12	15,6	2,0	30,1	2,8	-	-	-	-
13	15,5	1,8	30,9	2,7	-	-	-	-
14	15,1	1,8	31,8	2,9	69,6	0,6	36,9	2,8
15	14,8	1,7	33,0	3,0	-	-	-	-
16	14,5	1,6	31,8	3,6	70,3	0,6	32,4	2,9

Температура теплоносителя в подводящих коробах центрального вертикального сечения камеры сушки распределена достаточно равномерно. Её отклонения от среднего по высоте камеры значения укладываются в диапазон 1,0...3,4оС.

На рис. 1 представлено изменение температуры и влажности зерна по высоте камеры сушки. В ее верхней части характерно интенсивное увеличение температуры зерна, которое продолжается приблизительно до 6-го ряда коробов. В средней части рост температуры замедляется, но возрастает скорость влагоудаления. Начиная приблизительно с 12-го ряда коробов, температура зерна вновь повышается интенсивнее. На уровне последнего ряда температура зерна стабилизируется, или даже снижается, что объясняется подсосом атмосферного воздуха через выгрузной аппарат сушиллки.

Рис. 1. Изменение влагосодержания (а) и температуры (б) зерна по высоте камеры сушки

Это подтверждается изменением температуры теплоносителя в отводящих коробах (рис. 2). Для большинства опытов характерно повышение температуры отработанного теплоносителя по мере сушки зерна, и уменьшение его температуры на 2,0...10,9оС к последнему ряду коробов. Изменение средних температур теплоносителя по высоте камеры составило 7,3...20,4оС.

Рис. 2. Изменение температуры теплоносителя по высоте камеры сушки

Среднеквадратические отклонения колебаний влажности зерна к выходу из сушильной камеры понижаются (табл. 1 и 2), что свидетельствует о её способности сглаживать их амплитуду, а температуры зерна и теплоносителя, наоборот, повышаются. Отношение дисперсии колебаний влажности зерна на выходе камеры к дисперсии колебаний влажности на её входе укладывается в диапазон 0,61...0,85.

Разброс средних температур теплоносителя в горизонтальном сечении камеры сушки достигает 1,0...8,9оС, разброс влажностей зерна составляет 1,4...12,9%, а разброс температур зерна – 5,4...25,2оС для 14-го ряда. Это значительно превышает задаваемую агротехническими требованиями [15] неравномерность выполнения процесса сушки.

Рис. 3. Изменение температуры зерна вдоль коробов 14 ряда

Какой-либо устойчивой закономерности в распределении полей температуры и влажности зерна по ширине камеры не обнаружено. Однако обнаружена закономерность изменения температуры зерна вдоль коробов. Во всех опытах (рис. 3) наблюдались более высокие температуры зерна вблизи отводящего диффузора. Это является следствием неравномерного распределения теплоносителя вдоль коробов [8-9]. В конце коробов у стенки отводящего диффузора подача теплоносителя больше, чем в их средней части, что определяет больший подвод тепловой энергии к зерну. Изменение температуры зерна вдоль короба достигает 4,9...25,2оС. Для эффективного перераспределения потоков газа вдоль коробов могут быть использованы мероприятия, предложенные в [8-11].

По реализациям случайных процессов вычислены оценки нормированных корреляционных функций и функций спектральной плотности (табл. 3 и 4). Анализ типичных сглаженных оценок нормированных корреляционных функций (рис. 4) позволяет сделать вывод об их эргодических свойствах. Период колебаний существенных частот оказался сопоставим с экспозицией сушки.

Таблица 3. Динамические характеристики процессов на входе и выходе камеры сушки

Процесс	ρ , мин	f , с-1·10-3
$W(t)$	15...60	6,0...13,0
$\vartheta_{30}(t)$	18...67	5,5...15,0
$W(t)$	27...63	6,3...13,8
$\vartheta_3(t)$	15...46	7,0...13,5

Таблица 4. Динамические характеристики процессов внутри камеры сушки

Ряд кор- бов	Процессы					
	$W(t)$		$\vartheta_3(t)$		$\vartheta_T(t)$	
	ρW , мин	fW , с-1·10-3	$\rho\vartheta_3$, мин	$f\vartheta_3$, с-1·10-3	$\rho\vartheta_T$, мин	$f\vartheta_T$, с-1·10-3
2	27,0...43,0	9,0...10,5	12,0...30,0	6,0...16,5	12,0...51,0	7,0...22,5
6	23,0...43,0	9,0...10,5	12,0...36,0	7,5...16,5	12,0...33,0	6,0...16,5
8	25,0...33,0	7,5...10,5	12,0...36,0	7,5...16,5	15,0...39,0	6,0...16,5
11	20,0...25,0	7,5...9,0	12,0...35,0	10,5...18,5	15,0...35,0	7,5...18,0
14	25,0...30,0	6,0...7,5	13,5...39,0	7,5...24,0	10,0...35,0	6,0...16,5
15	20,0...40,0	6,0...10,5	15,0...40,0	7,5...12,0	12,0...42,0	6,0...18,0

Рис. 4. Нормированные корреляционные функции процессов изменения $\vartheta_3(t)$ и $W(t)$ зерна на входе (а) и на выходе (б) из сушилки

Интервалы корреляции ρ и граничные частоты f процесса изменения влажности зерна $W(t)$ по высоте камеры сушки (табл. 4) практически не изменяются. Это подтверждает, что сушилка как динамическое звено не меняет структуру (частотный состав) процесса $W(t)$. Стабильным по высоте камеры сохраняется также частотный состав процесса изменения температуры теплоносителя $\vartheta_T(t)$.

Меняются по высоте камеры показатели процесса изменения температуры зерна $\vartheta_3(t)$. По мере его нагрева и обезвоживания интервалы корреляции и граничные частоты постепенно приближаются к аналогичным показателям процесса $W(t)$. Это подтверждает связь между ними.

Взаимные корреляционные функции процессов по каналам преобразования возмущающих воздействий подтверждают существование между ними

тесной корреляционной связи, сдвиг максимума которой, практически равен экспозиции. Коэффициенты взаимной корреляции процессов $W_0(t) - \vartheta_3(t)$ и $\vartheta_3(t) - \vartheta_3(t)$ в зависимости от режима сушки переменны и принимают как положительные, так и отрицательные значения (табл. 5). При низких влажностях зерна ($W_0 < 20\%$) коэффициенты отрицательны, а при высоких – положительные.

Таблица 5. Коэффициенты взаимной корреляции процессов

Процессы	Значения
$W_0(t) - \vartheta_3(t)$	-0,48...0,32
$W_0(t) - W(t)$	0,37...0,61
$W(t) - \vartheta_3(t)$	-0,77...0,39

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

Положительная корреляционная связь процессов $\vartheta_{30}(t) - \vartheta_3(t)$ обнаружена в верхней части камеры сушки. Однако по мере удаления зоны сушки от начала камеры коэффициент взаимной корреляции процессов интенсивно убывает (рис. 5), сдвиг максимума корреляционной связи обусловлен транспортным запаздыванием. В зонах, расположенных ниже шестого ряда коробов (1/3 часть высоты камеры), 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 $W_0(t)$.

Рис. 5. Нормированные взаимные корреляционные функции процессов $\vartheta_{30}(t) - \vartheta_3(t)$ на уровне второго и четвертого ряда отводящих коробов

Принимая гипотезу о нормальном законе распределения случайной функции изменения влажности зерна на выходе камеры сушки, определена вероятность её пребывания в заданном агротехническими требованиями [15] симметричном допуске ($\Delta W = \pm 1,5\%$), которая при среднеквадратических отклонениях, укладываемых в диапазон $\sigma W = 0,9...2,3(\%)^2$, составляет $P\Delta = 0,48...0,90$. Это подтверждает низкое качество выполнения рабочего процесса в сушилках и обуславливают необходимость разработки мероприятий уменьшающих дисперсию колебаний влажности зерна в процессе сушки. Эффективное решение такой задачи может быть достигнуто применением системы управления, предложенной в [12-14].

Заключение

Полученная информация характеризует сушилку как стохастическую, распределённую, многосвязную динамическую систему, обладающую транспортным запаздыванием и нелинейными (а по ряду каналов экстремальными) связями между основными переменными состояния её рабочего процесса. Колебания начальной влажности зерна вызывают значительные колебания его температуры и влажности в сушилке, период которых сопоставим с экспозицией сушки. Сушилка способна уменьшать дисперсию колебаний влажности зерна, тем не менее, неравномерность нагрева и сушки зерна во времени и пространстве её рабочей камеры превышает агротехнические допуски, что подтверждают низкое качество выполнения рабочего процесса. Установлено, что у стенки отводящей камеры зерно нагревается больше, чем в центральной части распределительных коробов, что объясняется неравномерным распределением газа вдоль них. Для повышения качества и интенсивности сушки предложены усовершенствованные системы распределения газа и управления рабочим процессом.

Список литературы:

1. Андрианов Н.М., Манасян С.К. и др. Оценка статистических характеристик потока зернового вороха, поступающего в сушилку // Тракторы и сельхозмашины. 2015. №2. С. 20-22.
2. Андрианов Н.М., Шуньчи Мэй и др. Задание начальных условий и стохастической составляющей математической модели процесса сушки зерновых сушилок // Ползуновский альманах. 2014. №2. С. 30-35.
3. Андрианов Н.М., Галкин А.Д. и др. Регулирование тепловых режимов в сушилках с гравитационным движущимся слоем // Тракторы и сельхозмашины. 2014. №4. С. 30-33.
4. Андрианов Н.М., Галкин А.Д. и др. Тепловые режимы в шахтных зерносушилках // Сельский механизатор. 2014. № 9. С. 12-13.
5. Андрианов Н.М., Шуньчи Мэй. Обоснование системы стабилизации потока теплоты для зерносушилок шахтного типа // Фундаментальные исследования. 2014. №8 (часть 7). С. 1518-1523.
6. Андрианов Н.М., Шуньчи Мэй. Контроль и регулирование температуры зерна в шахтных сушилках // Тракторы и сельхозмашины. 2014. №8. С. 9-13.
7. Андрианов Н.М., Шуньчи Мэй. Обоснование системы регулирования температуры зерна для сушилок шахтного типа // Фундаментальные исследования. 2014. №11 (часть 2). С. 259-265.
8. Андрианов Н.М., Николаенок А.В. Совершенствование системы распределения газа шахтных зерносушилок // Вестник Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого. 2013. № 71. Т.2. С. 4-7.
9. Андрианов Н.М. Оптимизация системы распределения теплоносителя шахтных зерносушилок // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2008. №10. С. 160-164.
10. Андрианов Н.М. Устройство распределения газа в шахтной зерносушилке // Патент RU 2269079. 2006, Бюл. № 07.

11. Андрианов Н.М., Иванов М.А. Способ распределения газа в шахтной зерносушилке и устройство для его осуществления // Патент RU 2538185. 2015, Бюл. № 01.
12. Андрианов Н.М., Колесов Л.В. и др. Способ автоматического регулирования процесса сушки зерна и устройство для его осуществления // Патент RU 2157958. 2000, Бюл. № 29.
13. Андрианов Н.М., Колесов Л.В. и др. Способ автоматического регулирования процесса сушки зерна в шахтной зерносушилке и устройство для его осуществления // Патент RU 2018076. 1994, Бюл. № 15.
14. Андрианов Н.М. Способ автоматического регулирования процесса сушки зерна и устройство для его осуществления // Патент RU 2135917. 1999, Бюл. № 24.
15. Чижиков А.Г. Операционная технология послеуборочной обработки и хранения зерна (в Нечерноземной зоне). М.: Россельхозиздат, 1981. 191 с.

© 2014, Андрианов Н.М., Мэй Шуньчи, Сюе Юн
Исследование шахтной сушилки в условиях
нормальной эксплуатации

© 2014, Andrianov N.M., Mei Shunqi, Xue Yong
Research of shaft dryer in the conditions of normal
operation