

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ БАРАБАННОЙ ЗЕРНОСУШИЛКИ И ИХ ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Н. М. Андрианов^{1, 2}, Мэй Шунчи², Сюе Юн²

¹ Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого,
г. Великий Новгород, Россия

² Уханьский текстильный университет, г. Ухань, Китай

Методами моделирования и экспериментальных исследований изучены стационарные режимы барабанной зерносушилки. Даны рекомендации по их интенсификации и совершенствованию системы контроля.

Ключевые слова: сушилка барабанная, режимы сушки, моделирование, оптимизация

THE STUDY OF STATIONARY REGIMES OF THE DRUM GRAIN DRYERS AND THEIR OPTIMIZATION BY METHODS OF MATHEMATICAL MODELING

N. M. Andrianov^{1, 2}, Mei Shunqi², Xue Yong²

¹ Novgorod State University, Veliky Novgorod, Russia

² Wuhan Textile University, Wuhan, China

Methods of modeling and experimental studies investigated stationary regimes of drum grain dryer. Recommendations for their intensification and improvement of the system of control are given.

Ключевые слова: the dryer drum, drying regimes, modeling, optimization

Введение. Зерно, обработанное в барабанных сушилках, часто теряет свои технологические свойства, по этой причине у сушильщиков возникают затруднения с выбором оптимальных режимов его обработки [1 – 6]. Это объясняется тем, что рабочая камера сушилки является сложным и недостаточно изученным объектом управления, а ее система контроля над протеканием процесса недостаточно надежна. В связи с этим возникла необходимость дополнительного изучения рабочего процесса сушилок.

Цель исследования.

Совершенствование технологических режимов барабанных зерносушилок и системы контроля над их протеканием.

Материал и методы исследования.

В работе приведены результаты экспериментальных исследований сушилки СЗСБ-4 в условиях производства, а также результаты математического моделирования ее рациональных режимов.

Решалась задача определения взаим-

ных связей между входными и выходными переменными процесса сушки (рисунок 1), состояние которого определяется температурой теплоносителя $\vartheta_T(t)$, 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 $\vartheta_{T0}(t)$ и экспозиция $G(t)$ – режим обработки.

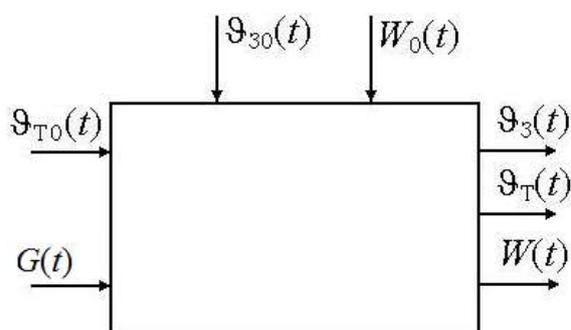


Рисунок 1 – Модель рабочего процесса барабанной сушилки

При исследовании экспозицию сушки $G(t)$ и температуру теплоносителя $\vartheta_{\text{ТО}}(t)$ на входе в рабочую камеру стабилизировали автоматически. Значение экспозиции $G(t)$ задавали изменением подачи зернового вороха. Температуру и влажность зерна фиксировали на входе и выходе, а также в различных точках по длине рабочей камеры. Температуру теплоносителя фиксировали на ее выходе.

Измерение температуры и влажности зерна в камере осуществляли методом отбора проб. Для этого в стенке камеры выполнили отверстия, снабженные задвижками с электромагнитным приводом. Устройство позволило осуществить периодический отбор проб без остановки вращения рабочей камеры. Каждая проба автоматически сыпалась в термос, где измерялись ее температура и влажность. Расположение мест отбора проб относительно начала камеры показано в таблице 2.

Обрабатывали культуру рожь «Вятка» семенного, продовольственного и фуражного

назначения. Подачу вороха $G(t)$ в опытах поддерживали в интервале 1,4...4,4 т/ч, температуру теплоносителя $\vartheta_{\text{ТО}}(t)$ – в интервале 100...250 °С. Продолжительность опытов в разные дни составила 4...6 часов. Это позволило на входе и выходе камеры получать 60...100 измерений при интервале фиксации процессов 3 минуты, а внутри камеры – 24...36 измерений при интервале фиксации 10 минут. Всего получено 24 стационарных реализации.

Полученные результаты обработаны статистическими методами.

Результаты исследования и их обсуждение.

Статистические характеристики переменных состояния процесса сушки (таблица 1) 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 [7 – 11].

Таблица 1 – Статистические характеристики переменных на входе и выходе сушилки

№ опыта	На входе						На выходе					
	G , т/ч	$\vartheta_{\text{ТО}}$, °С	W_0 , %	σ_{W_0} , (%) ²	ϑ_{30} , °С	$\sigma_{\vartheta_{30}}$, °С ²	W , %	σ_W , (%) ²	ϑ_3 , °С	σ_{ϑ_3} , °С ²	$\vartheta_{\text{Т}}$, °С	$\sigma_{\vartheta_{\text{Т}}}$, °С ²
1	2,4	150	26,6	0,55	22,5	0,60	19,5	0,49	40,0	0,56	56,0	0,64
2	4,4	150	25,4	0,51	22,0	0,35	21,5	0,46	38,0	0,81	49,0	1,02
3	4,4	200	25,4	1,84	22,0	0,38	20,3	1,62	45,0	1,29	57,0	1,53
4	4,4	100	25,4	2,11	22,0	0,76	23,0	2,05	32,5	2,16	41,0	2,09
5	3,4	150	27,9	1,64	11,5	1,11	23,5	1,32	31,5	1,56	50,0	1,69
6	3,4	250	26,5	1,92	13,0	0,96	17,2	1,53	46,0	2,06	90,0	2,59
7	3,4	200	26,1	0,71	14,5	0,69	17,3	0,45	44,0	1,03	86,0	2,16
8	1,4	100	26,0	0,52	14,0	0,86	21,0	0,41	37,0	1,13	52,0	1,64
9	1,4	200	25,9	1,56	15,0	1,03	14,0	1,09	63,0	1,82	81,0	1,45
10	1,4	250	25,9	1,32	15,5	0,92	13,0	0,63	65,0	0,96	98,0	1,29
11	1,4	150	23,2	0,52	15,0	1,23	17,0	0,43	49,0	0,56	67,0	0,63
12	1,4	150	20,8	0,55	27,8	1,21	15,8	0,42	52,0	0,45	84,0	0,85
13	3,4	150	21,2	0,98	28,0	1,32	16,4	0,69	46,0	1,34	62,0	1,54
14	4,4	150	21,2	0,51	28,0	0,95	18,1	0,39	42,5	0,84	54,0	1,11
15	2,4	150	21,2	0,54	28,5	0,89	16,3	0,36	52,0	0,78	62,0	0,88
16	2,4	250	20,8	0,56	30,0	1,29	11,0	0,37	68,0	1,15	92,0	1,45
17	2,4	100	22,3	1,96	10,5	0,69	19,8	1,38	31,5	2,05	45,0	2,65
18	2,4	200	22,0	2,09	12,0	0,97	16,0	1,32	44,5	1,84	64,0	1,56
19	2,4	250	21,0	1,41	13,0	1,06	14,8	0,86	52,0	1,28	82,0	1,92
20	3,4	150	18,2	1,24	9,0	1,06	16,2	1,02	35,0	1,56	52,0	1,78
21	3,4	100	19,0	1,29	8,5	1,32	17,2	1,13	29,5	1,39	38,0	1,68
22	1,4	100	21,0	0,96	8,5	1,56	16,7	0,81	34,0	1,22	52,0	1,65
23	4,4	200	20,1	0,62	15,5	0,69	16,2	0,53	41,5	0,92	63,0	1,42
24	4,4	100	20,2	0,59	4,5	1,65	19,3	0,53	28,0	0,63	37,0	0,96

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ БАРАБАННОЙ ЗЕРНОСУШИЛКИ И ИХ ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Влажность зерна на входе изменялась в диапазоне 18,2...26,6 % при $\sigma_{W0} = 0,51...2,11 (\%)^2$, а температура – в пределах 4,5...30,0 °С при $\sigma_{\vartheta_{30}} = 0,35...1,65 \text{ } ^\circ\text{C}^2$.

При изменении температуры теплоносителя $\vartheta_T(t)$ в диапазоне 100...250 °С в камере сушки удавалось снизить влажность зерна на 0,9...12,9 %, при этом его нагрев оставался ниже предельно допустимого.

Среднеквадратические отклонения колебаний влажности зерна к выходу из сушильной камеры понижаются, что свидетельствует о её способности сглаживать их амплитуду, а температуры зерна и теплоносителя, наоборот, повышаются. Установлено, что с повышением температуры теплоносителя ϑ_{T0} и снижением подачи зерна G в каме-

ру её способность сглаживать колебания влажности зерна улучшается. Отношение дисперсии колебаний влажности зерна на выходе камеры к дисперсии колебаний влажности на её входе укладывается в диапазон 0,37...0,94.

С увеличением температуры теплоносителя повышается влагосъем зерна $\Delta W = W_0 - W$ и температура его нагрева, что свидетельствует об интенсификации сушки. Увеличение подачи G ведет к уменьшению влагосъема и температуры зерна.

Для некоторых режимов (таблица 1) изменение средних значений влажности и температуры зерна по длине рабочей камеры представлены в таблице 2, а на рисунке 2 пример протекания этих зависимостей.

Таблица 2 – Изменение влажности и температуры зерна по длине рабочей камеры

№ опыта	Подача G , т/ч	Переменная	Расстояние точки контроля от начала камеры, м										
			На входе	0,87	1,30	1,88	2,46	2,96	3,69	4,41	5,21	6,00	На выходе
1	2,4	W , %	26,6	25,4	24,8	24,2	23,8	23,5	23,2	22,8	22,3	21,4	19,5
		ϑ_3 , °С	22,5	33,4	38,0	42,5	45,2	46,5	46,7	45,6	43,5	41,2	40,0
		ϑ_T , °С	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	4,4	W , %	25,4	24,9	24,6	24,3	23,9	23,7	23,3	22,9	22,5	22,0	21,5
		ϑ_3 , °С	22,0	32,9	36,5	39,8	41,7	42,4	42,2	41,1	39,7	38,7	38,0
		ϑ_T , °С	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	4,4	W , %	25,4	24,5	24,1	23,5	22,9	22,4	21,8	21,2	20,7	20,4	20,3
		ϑ_3 , °С	22,0	35,6	40,4	44,7	47,2	48,7	47,8	46,6	45,1	44,5	45,0
		ϑ_T , °С	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	4,4	W , %	25,4	25,2	25,1	24,9	24,7	24,4	14,0	23,6	23,2	23,0	23,0
		ϑ_3 , °С	22,0	27,7	29,9	32,0	33,3	33,9	34,1	33,7	33,1	32,6	32,5
		ϑ_T , °С	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3,4	W , %	18,2	17,8	17,5	17,2	16,9	16,7	16,5	16,3	16,1	16,1	16,2
		ϑ_3 , °С	9,0	22,2	27,9	33,6	37,3	39,2	40,3	39,8	38,2	36,4	35,0
		ϑ_T , °С	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Из их протекания видно, что по мере перемещения зерна по камере его влажность W уменьшается, а температура ϑ_3 сначала интенсивно увеличивается, приблизительно к середине камеры стабилизируется, а затем понижается. Объясняется это тем, что зерно и теплоноситель движутся по камере в одном

направлении. В начале камеры температура теплоносителя высока, а зерна мала, поэтому наблюдается интенсивный нагрев зерна и понижение температуры теплоносителя при незначительном понижении влажности зерна. По мере нагрева зерна интенсифицируется процесс испарения влаги, что ведет к посте-

пенному замедлению роста температуры зерна. Этому же способствует одновременное монотонное понижение температуры теплоносителя по мере продвижения по камере. В зоне, расположенной от начала камеры на расстоянии приблизительно 0,45...0,75 её длины, процесс увеличения температуры зерна завершается, но наблюдается интенсивное уменьшение влажности. Дальнейшее понижение температуры теплоносителя ведет к уменьшению количества теплоты, подводимой к зерну, поэтому его температура, а, следовательно, и скорость испарения влаги постепенно уменьшаются.

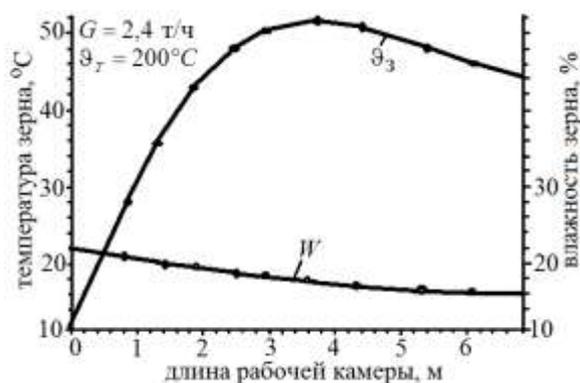


Рисунок 2 – Изменение температуры и влажности зерна вдоль рабочей камеры

$$\frac{\partial W}{\partial t} + V_3 \cdot \frac{\partial W}{\partial x} = -k_\beta \cdot W \cdot \Theta_3,$$

$$\frac{\partial \Theta_3}{\partial t} + V_3 \cdot \frac{\partial \Theta_3}{\partial x} = -\frac{r}{100 \cdot c_3} \cdot k_\beta \cdot W \cdot \Theta_3 + \frac{m}{R \cdot c_3 \cdot \rho_3} \cdot k_\alpha^C \cdot (1 + k_\alpha^V \cdot k_\beta \cdot W \cdot \Theta_3) \cdot (\Theta_T - \Theta_3),$$

$$\frac{\partial \Theta_T}{\partial t} + V_T \cdot \frac{\partial \Theta_T}{\partial x} = -\frac{m \cdot (1 - \varepsilon)}{R \cdot \rho_T \cdot c_T \cdot \varepsilon} \cdot k_\alpha^C \cdot (1 + k_\alpha^V \cdot k_\beta \cdot W \cdot \Theta_3) \cdot (\Theta_T - \Theta_3),$$

с начальными условиями: $W(0, x) = W_0(x)$, $\Theta_3(0, x) = \Theta_{30}(x)$, $\Theta_T(0, x) = \Theta_{T0}(x)$,

граничными условиями: $W(t, 0) = W_0(t)$, $\Theta_3(t, 0) = \Theta_{30}(t)$, $\Theta_T(t, 0) = \Theta_{T0}(t)$,

$W(t, \infty) = W_p$, $\Theta_3(t, \infty) = \Theta_T(\infty, L)$ при $W(0, 0) = W_0(t)$, $\Theta_3(0, 0) = \Theta_{30}(t)$.

Здесь W , Θ_3 и Θ_T – влагосодержание зерна, температура зерна и температура теплоносителя; t , x – координаты времени и пространства; V_3 и V_T – скорость перемещения зерна и теплоносителя по камере сушки; r – скрытая теплота парообразования; c_3 и ρ_3 – удельная теплоемкость и плотность зерна; c_T и ρ_T – удельная теплоемкость и плотность теплоносителя; R и m – эквивалентный радиус и коэффициент формы зерновки; ε – скважность зернового слоя; L – длина камеры сушки; k_β , k_α^C , k_α^V – модельные коэффициенты.

Набор значений модельных коэффициентов уравнений определен по экспериментальным данным методом решения обратной за-

дачи тепло- и массопереноса [21]. Для любого режима (таблицы 1, 2) относительная погрешность аппроксимации экспериментальных

С изменением подачи G зерна в камеру (таблица 2) зона максимального нагрева незначительно смещается по её длине. Так при меньших подачах G зона максимального нагрева располагается ближе к началу камеры, при больших – дальше. Значение превышений температуры зерна в зоне максимального нагрева над температурой на выходе камеры достигает 1,2...7,2 °С. Это превышение тем выше, чем больше начальная влажность зерна W_0 , температура теплоносителя Θ_{T0} и меньше подача G .

Принимая гипотезу о нормальном законе распределения случайной функции изменения влажности зерна на выходе камеры сушки, определена вероятность ее пребывания в заданном агротехническими требованиями [11] симметричном допуске ($\Delta_W = \pm 1,5\%$), которая при среднеквадратических отклонениях, укладываемых в диапазон $\sigma_W = 0,36...2,05(\%)^2$, составляет $P_\Delta = 0,54...0,99$. Это подтверждает низкое качество выполнения рабочего процесса в сушилках.

Таким образом, полученная информация характеризует сушилку как стохастическую, распределённую, многосвязную динамическую систему с нелинейными связями между переменными состояния её рабочего процесса, функционирование которой имеет низкие показатели качества [6, 12 – 17].

Возможности совершенствования рабочего процесса сушилки и её системы контроля оценили методами математического моделирования с использованием уравнений [5, 18 – 20]:

Возможности совершенствования рабочего процесса сушилки и её системы контроля оценили методами математического моделирования с использованием уравнений [5, 18 – 20]:

Возможности совершенствования рабочего процесса сушилки и её системы контроля оценили методами математического моделирования с использованием уравнений [5, 18 – 20]:

Возможности совершенствования рабочего процесса сушилки и её системы контроля оценили методами математического моделирования с использованием уравнений [5, 18 – 20]:

Возможности совершенствования рабочего процесса сушилки и её системы контроля оценили методами математического моделирования с использованием уравнений [5, 18 – 20]:

Возможности совершенствования рабочего процесса сушилки и её системы контроля оценили методами математического моделирования с использованием уравнений [5, 18 – 20]:

Возможности совершенствования рабочего процесса сушилки и её системы контроля оценили методами математического моделирования с использованием уравнений [5, 18 – 20]:

Возможности совершенствования рабочего процесса сушилки и её системы контроля оценили методами математического моделирования с использованием уравнений [5, 18 – 20]:

Возможности совершенствования рабочего процесса сушилки и её системы контроля оценили методами математического моделирования с использованием уравнений [5, 18 – 20]:

Возможности совершенствования рабочего процесса сушилки и её системы контроля оценили методами математического моделирования с использованием уравнений [5, 18 – 20]:

Возможности совершенствования рабочего процесса сушилки и её системы контроля оценили методами математического моделирования с использованием уравнений [5, 18 – 20]:

Возможности совершенствования рабочего процесса сушилки и её системы контроля оценили методами математического моделирования с использованием уравнений [5, 18 – 20]:

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ БАРАБАННОЙ ЗЕРНОСУШИЛКИ И ИХ ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

данных результатами их моделирования не превышает: для влажности зерна – 0,08, для температуры зерна – 0,12, для температуры теплоносителя 0,14. Моделирование стационарных режимов сушки реализовано в среде математического пакета MAPLE [5].

Зависимости кинетики нагрева и сушки зерна в сушилке приведены на рисунке 3. Представленные данные подтверждают, что для всех режимов сушки температура зерна ϑ_3 достигает максимального значения в средней части сушильной камеры, а к выходу из неё понижается на 5...15 °С. При семенных и продовольственных режимах максимальные значения температуры близки к предельно допустимым $\vartheta_{3Д}$, что важно учитывать в практике эксплуатации сушилок и раз-

работке рекомендаций по совершенствованию системы контроля.

Даже при семенных режимах (рисунок 3, б) скорость влагоудаления dW/dt в средней части сушильной камеры достигает предельно допустимых значений $(dW/dt)_Д$, что может являться одной из причин ухудшения качественных показателей семенного зерна. При продовольственных режимах (рисунок 3, а), вследствие применения более высоких температур теплоносителя $\vartheta_{Т0}$, скорость влагоудаления увеличивается до 15...25 %/ч и значительно превышает допустимую (10 %/ч). Столь интенсивная сушка может приводить к появлению чрезмерных внутренних напряжений в зерновках и растрескиванию их оболочек.

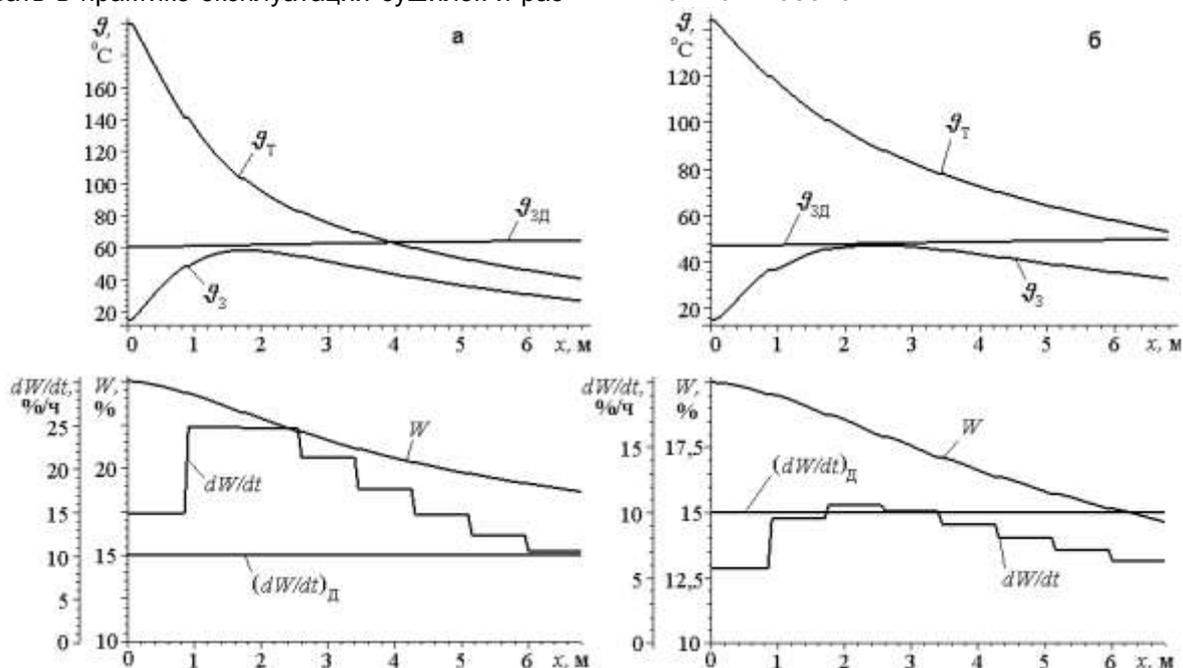


Рисунок 3 – Кинетика нагрева и сушки зерна: (а) – продовольственного назначения; (б) – семенного

Выполненный анализ вскрывает ряд недостатков эксплуатации барабанных сушилок. Во-первых, система контроля рабочего процесса сушилок несовершенна. Контроль температуры зерна необходимо осуществлять в зоне его максимального нагрева в рабочей камере, которая располагается в ее средней части, а не на выходе. Во-вторых, для эксплуатации сушилок рекомендованы неоправданно интенсивные режимы, при которых нагрев зерна и скорость влагоудаления достигают предельно допустимых значений. Для продовольственных режимов скорость влагоудаления значительно превышает допустимую. Отмеченные особенности в сочета-

нии с отсутствием надежной системы контроля над протеканием процесса нередко ведут к понижению качественных показателей обрабатываемого зерна. По этим причинам барабанные сушилки в практике эксплуатации получают много нареканий и в хозяйствах ограниченно используются для сушки семенного зерна [1 – 2].

Вместе с тем, имеются резервы совершенствования процесса сушки. На рисунке 4 приведены зависимости кинетики нагрева и сушки зерна в сушилке, иллюстрирующие возможность интенсификации процесса за счет предварительного нагрева зерна. Приведенные данные подтверждают, что с уве-

личением начальной температуры зерна ϑ_{30} возрастает его нагрев ϑ_3 во всей сушильной камере, а, следовательно, и интенсивность процессов тепло- и массопереноса. Это подтверждается увеличением скорости сушки зерна dW/dt во всех зонах рабочей камеры, за счет чего удастся увеличить производительность сушилки. Расчеты показывают, что за счет предварительного нагрева зерна кратность увеличения производительности сушилки может составить 1,3...1,5.

При моделировании режимов с предварительным нагревом зерна выявлено, что температура ϑ_{30} , до которой его можно нагревать ограничена. Так из данных рисунка 4 видно, что при повышении начальной температуры зерна существенно возрастают скорость сушки dW/dt и нагрев зерна ϑ_3 в начальной зоне рабочей камеры. Поэтому, дальнейшее увеличение начальной температуры зерна ограничено достижением их предельно допустимых значений $(dW/dt)_Д$ и $\vartheta_{3Д}$ в рабочей камере.

Возможности реализовать распределенное управление тепловыми режимами в барабанной сушилке отсутствуют. Однако их можно реализовать в сушильной линии из нескольких барабанных сушилок.

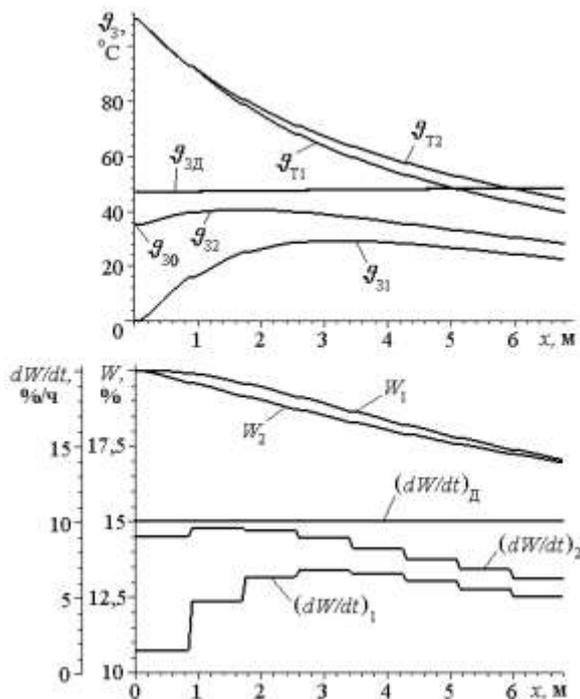


Рисунок 4 – Кинетика нагрева и сушки зерна: 1 – без предварительного нагрева ($G_1 = 2,4$ т/ч); 2 – с частичным предварительным нагревом ($G_2 = 3,6$ т/ч)

Выводы

1. Полученная информация характеризует барабанную сушилку как стохастическую, распределённую, многосвязную динамическую систему, обладающую транспортным запаздыванием и нелинейными связями между основными переменными состояния её рабочего процесса. Колебания начальной влажности и температуры 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.

2. Установлено, что температура зерна достигает максимального значения в средней части рабочей камеры, а к выходу из неё понижается на $1,2...15,0$ °С. Максимальные значения температуры и скорости влагоудаления здесь близки к предельно допустимым, что может являться причиной ухудшения качественных показателей зерна. Поэтому контроль интенсивности сушки необходимо осуществлять не на выходе рабочей камеры, а в зоне с максимальным нагревом зерна.

3. Возможно увеличение производительности сушилки в 1,3 – 1,5 раза за счет предварительного нагрева зерна. Однако температура предварительного нагрева зерна ограничена достигаемой интенсивностью процесса внутри рабочей камеры. Распределенное управление тепловыми режимами сушки можно реализовать в сушильной линии из нескольких барабанных сушилок.

Список литературы

1. Бабаев, О. Б. Выбор режимов сушки зерна / О. Б. Бабаев, Л. В. Колесов, А. М. Сенников // Техника в сельском хозяйстве. – 1986. – № 2. – С. 49-50.
2. Миттельман, Г. С. Рекомендации по сушке семян на шахтных и барабанных сушилках / Г.С. Миттельман, Н. А. Филатов // Селекция и семеноводство. – 1979. – № 1. – С. 41-45.
3. Андрианов, Н. М. Выбор режимов сушки зерна / Н. М. Андрианов // Сельский механизатор. – 2011. – № 8. – С. 8-9.
4. Андрианов, Н. М. Оптимизация технологических режимов барабанных зерносушилок / Н. М. Андрианов, Н. Н. Судаков, А. В. Макаров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2010. – № 3. – С. 201-206.
5. Андрианов, Н. М. Оптимизация зерновых сушилок и их систем управления / Н. М. Андрианов // Депонированная рукопись № 197-В2005 10.02.2005 г. – 299 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ БАРАБАННОЙ ЗЕРНОСУШИЛКИ И ИХ ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

6. Андрианов, Н. М. Исследование стационарных режимов барабанной зерносушилки и возможностей повышения их интенсивности / Н. М. Андрианов, Мэй Шунчи, Сюе Юн // Тракторы и сельхозмашины. – 2015. – № 10. – С. 48-52.
7. Андрианов, Н. М. Оценка статистических характеристик потока зернового вороха, поступающего в сушилку / Н. М. Андрианов, С. К. Манасян и др. // Тракторы и сельхозмашины. – 2015. – № 2. – С. 20-22.
8. Андрианов, Н. М. Задание начальных условий и стохастической составляющей математической модели процесса сушки зерновых сушилок / Н. М. Андрианов, Шунчи Мэй и др. // Ползуновский альманах. – 2014. – № 2. – С. 30-35.
9. Андрианов, Н. М. Повышение эффективности функционирования зерновых сушилок / Н. М. Андрианов // Современные наукоемкие технологии. – 2004. – № 2. – С. 175-177.
10. Андрианов Н. М. Особенности работы зерновых сушилок / Н. М. Андрианов // Техника в сельском хозяйстве. – 2006. – № 4. – С. 9-12.
11. Чижиков, А. Г. Операционная технология послеуборочной обработки и хранения зерна (в Нечерноземной зоне) / А. Г. Чижиков и др. – М.: Россельхозиздат, 1981. – 191 с.
12. Андрианов, Н. М. Идентификация шахтной зерносушилки в условиях нормальной работы / Н. М. Андрианов, Шунчи Мэй и др. // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2 (часть 16). – С. 3459-3465.
13. Андрианов, Н. М. Регулирование тепловых режимов в сушилках с гравитационным движущимся слоем / Н. М. Андрианов // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – № 4. – С. 30–33.
14. Андрианов, Н. М. Исследование шахтной зерносушилки как объекта управления / Н. М. Андрианов // Успехи современного естествознания. – 2004. – № 9. – С. 86–91.
15. Андрианов, Н. М. Тепловые режимы в шахтных зерносушилках / Н. М. Андрианов, А. Д. Галкин, Шунчи Мэй и др. // Сельский механизатор. – 2014. – № 9. – С. 12-13.
16. Колесов, Л. В. Исследование средств управления температурой теплоносителя топочного агрегата / Л. В. Колесов, Н. М. Андрианов // Техника в сельском хозяйстве. – 1988. – № 1. – С. 49-51.
17. Андрианов, Н. М. Оптимизация структуры потоков газа и теплоты в шахтных зерносушилках / Н. М. Андрианов // Хранение и переработка зерна. – 2010. – № 11. – С. 60-62.
18. Андрианов, Н. М. Моделирование динамических характеристик барабанных зерносушилок / Н. М. Андрианов // Вестник МАНЭБ. – 2010. – Том 15. – № 3. – С. 103-113.
19. Андрианов, Н. М. Математическая модель сушильной камеры зерновых сушилок / Н. М. Андрианов // Успехи современного естествознания. – 2003. – № 11. – С. 101-102.
20. Андрианов, Н. М. Моделирование режимов сушки в шахтных зерносушилках / Н. М. Андрианов, Л. В. Колесов и др. // Вестник Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого. – 1999. – № 11. – С. 42-46.
21. Андрианов, Н. М. Алгоритм идентификации коэффициентов математической модели сушки зерна / Н. М. Андрианов // Сб. науч. трудов СПбГАУ. «Технологии и средства механизации сельского хозяйства». – С-Пб., 2005. – С. 5-9.
- Андрианов Николай Михайлович**^{1, 2} – д. т. н., профессор
Мэй Шунчи² (*Mei Shunqi*) – к. т. н., декан факультета механики и автоматике
Сюе Юн (*Xue Yong*)² – кандидат технических наук, доцент
- ¹ ФГБОУ ВО «Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого», г. Великий Новгород, Россия
² Уханьский текстильный университет, г. Ухань, Китай