

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ ШАХТНОЙ ЗЕРНОСУШИЛКИ МЕТОДАМИ АКТИВНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

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 планирования эксперимента изучены стационарные режимы шахтной зерносушилки. Выполнен анализ статики и кинетики рабочего процесса в сушильной камере. Даны рекомендации по интенсификации сушки и совершенствованию системы контроля.

Ключевые слова: зерносушилка шахтная, режимы сушки, экспериментальные исследования, интенсификация, система контроля

STUDY OF STATIONARY REGIMES OF THE GRAIN DRYER SHAFT BY METHODS OF ACTIVE EXPERIMENT

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

¹ Novgorod State University, Velikiy Novgorod, Russia,

² Wuhan Textile University, Wuhan, China

Stationary regimes of the grain dryer shaft were studied by methods of experiment planning. Was the analysis of the statics and kinetics of the workflow in the drying chamber. Presented recommendations for intensification of drying and improve the system of control.

Ключевые слова: grain dryer shaft, drying regimes, experimental studies, intensification, control system

Введение. В шахтных сушилках сложно высушить зерно в соответствии с агротехническими требованиями [1]. Это вызвано не только стохастическим характером изменения характеристик потока зернового вороха [2, 3], но и техническими особенностями сушилок и их системы контроля [4 – 6].

Оптимизация сушилок предполагает получение достоверной информации о рабочем процессе и качестве его выполнения, которую можно получить как теоретическими, так и экспериментальными методами [7].

В работе приведены результаты экспериментальных исследований стационарных режимов зерносушилки СЗШ-8, что позволило изучить структуру и взаимные связи переменных состояния ее рабочего процесса и выра-

ботать рекомендации по его интенсификации и совершенствованию системы контроля.

Цель исследования. Изучение статики и кинетики рабочего процесса в сушильной камере шахтной зерносушилки и повышение его эффективности.

Материал и методы исследования.

Исследование выполнено методами планирования эксперимента. Решалась задача определения взаимных связей между входными и выходными переменными процесса сушки (рисунок 1), состояние которого 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.

При исследовании экспозицию сушки $\omega(t)$ и температуру теплоносителя $\vartheta_T(t)$ на входе в рабочую камеру стабилизировали автоматически. Значение экспозиции $\omega(t)$ задавали изменением частоты колебаний выпускного аппарата.

В опытах использовали культуру рожь «Вятка». Начальные значения параметров зерна $\vartheta_{30}(t)$ и $W_0(t)$ обеспечивали методом искусственного увлажнения и нагрева по методике ВНИИЗ [8].

Температуру $\vartheta_3(t)$ и влажность $W(t)$ зерна фиксировали в центральном вертикальном и четырех горизонтальных сечениях камеры на уровне 4, 8, 12, и 15-го ряда коробов. Это позволило оценить поле влажности и температуры зерна в ее вертикальном и горизонтальных сечениях. Измерение влажности осуществляли методом отбора проб с после-

дующим высушиванием по методике ГОСТ 12041-82.

Область варьирования входными факторами задавали с учетом возможных изменений характеристик зерна и режимов сушки (таблица 1).

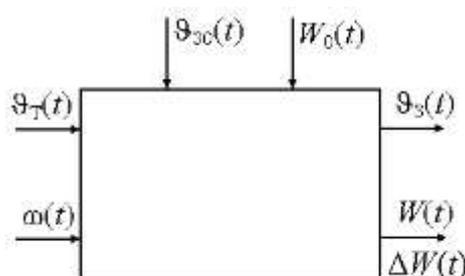


Рисунок 1 – Структурная схема сушильной камеры

Таблица 1 – Уровни факторов и интервалы варьирования

Уровни факторов и интервалы варьирования	Факторы			
	x_1	x_2	x_2	x_4
	$\vartheta_T(t), ^\circ\text{C}$	$W_0, \%$	$\omega, \text{мин}^{-1}$	$\vartheta_{30}(t), ^\circ\text{C}$
Основной уровень, (0) центр плана	100	22	24	15
Интервал варьирования, Δx_i	30	4	8	5
Верхний уровень, (+1)	130	26	32	20
Нижний уровень, (-1)	70	18	16	10
Звездная точка, (+1,414)	142,5	27,8	35,2	22
Звездная точка, (-1,414)	57,5	16,3	12,8	8

Для учета нелинейных свойств процесса реализовали ортогональный план второго порядка, что позволило получить функции отклика в виде полинома второй степени

$$m_{y/x_1, x_2, \dots, x_n} = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} \cdot x_i^2. \quad (1)$$

Опыты проводили для стационарных режимов, поэтому синхронный отбор проб и измерение основных переменных состояния процесса начинали после выхода сушилки на установившийся режим.

Первые опыты подтвердили, что начальная температура зерна ϑ_{30} влияет лишь на начальную стадию процесса. Ее влияние на температуру зерна в сушильной камере заметно лишь до 4...6 ряда коробов. На влажность зерна этот фактор влияния практически не оказывает. Это позволило значительно сократить трудоемкость исследования. В целом реализацию матрицы эксперимента завершили при полном переборе только трех факторов. Лишь для верхней ча-

сти камеры (до 6-го ряда коробов) план реализовали полностью.

Число повторности опытов, объем выборки в каждом из них, а также методику обработки информации приняли в соответствии с рекомендациями [9] при доверительной вероятности 0,95 к погрешности оценок измеряемых переменных.

Результаты исследования и их обсуждение.

Значимые оценки коэффициентов уравнений (1) в кодированных значениях факторов и их доверительные интервалы приведены в таблицах 2 и 3.

Совокупность уравнений (1) отражает распределение температуры и влажности зерна по высоте камеры и позволяет рассчитать кривые кинетики нагрева и сушки зерна при различных сочетаниях входных факторов. Отдельные уравнения позволяют оценить влияние факторов на протекание процесса в отдельных зонах камеры.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ ШАХТНОЙ ЗЕРНОСУШИЛКИ
МЕТОДАМИ АКТИВНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Таблица 2 – Оценки коэффициентов функции отклика – влагосъем $\Delta W = W_0 - W$

Коэффициенты и их доверительные интервалы	Ряд коробов					
	4	6	8	10	12	15
b_0	0,826	1,627	2,696	3,348	3,833	4,209
b_1	0,231	0,475	0,676	0,812	0,890	0,944
b_2	0,204	0,392	0,575	0,780	0,971	1,122
b_3	-0,511	-0,792	-0,987	-1,101	-1,160	-1,178
b_{12}	0,0	0,0	0,0	0,225	0,287	0,312
b_{13}	0,0	-0,210	-0,237	-0,250	-0,275	-0,275
b_{23}	-0,240	-0,297	-0,337	-0,425	-0,500	-0,537
b_{33}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,397
Δb_0	$\pm 0,400$	$\pm 0,492$	$\pm 0,526$	$\pm 0,542$	$\pm 0,601$	$\pm 0,645$
Δb_i	$\pm 0,149$	$\pm 0,183$	$\pm 0,196$	$\pm 0,206$	$\pm 0,224$	$\pm 0,240$
Δb_{ij}	$\pm 0,236$	$\pm 0,290$	$\pm 0,310$	$\pm 0,319$	$\pm 0,354$	$\pm 0,380$
Δb_{ij}	$\pm 0,166$	$\pm 0,205$	$\pm 0,219$	$\pm 0,225$	$\pm 0,250$	$\pm 0,264$

Таблица 3 – Оценки коэффициентов функции отклика – температура зерна ϑ_3

Коэффициенты и их доверительные интервалы	Ряд коробов						
	2	4	6	8	10	12	15
b_0	15,296	29,211	31,019	31,355	31,391	31,272	31,408
b_1	0,969	3,789	3,944	4,039	4,249	4,609	5,156
b_2	0,708	1,164	0,677	0,0	-0,449	-1,409	-2,689
b_3	-2,946	0,736	1,663	1,753	1,233	0,0	-1,305
b_4	3,981	0,805	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
b_{12}	0,0	0,0	-0,381	-0,493	-0,725	-0,900	-1,062
b_{13}	-0,981	0,406	0,318	0,0	0,0	-0,625	-0,962
b_{14}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
b_{23}	-0,681	0,0	0,0	0,0	0,650	1,250	2,012
b_{24}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
b_{34}	0,931	0,468	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
b_{11}	0,527	-1,332	-1,587	-1,572	-1,445	-1,195	-0,930
b_{22}	0,627	0,617	0,387	0,577	0,905	1,480	2,195
b_{33}	1,752	-1,757	-0,937	-0,472	0,0	1,180	2,545
b_{44}	0,652	1,018	0,613	0,0	0,0	0,0	0,0
b_{123}	0,0	0,543	0,631	0,831	1,125	1,350	1,387
Δb_0	$\pm 0,670$	$\pm 0,838$	$\pm 0,798$	$\pm 0,670$	$\pm 1,005$	$\pm 1,206$	$\pm 1,222$
Δb_i	$\pm 0,246$	$\pm 0,310$	$\pm 0,290$	$\pm 0,240$	$\pm 0,370$	$\pm 0,458$	$\pm 0,460$
Δb_{ij}	$\pm 0,390$	$\pm 0,490$	$\pm 0,470$	$\pm 0,370$	$\pm 0,590$	$\pm 0,690$	$\pm 0,720$
Δb_{ij}	$\pm 0,278$	$\pm 0,350$	$\pm 0,330$	$\pm 0,270$	$\pm 0,410$	$\pm 0,504$	$\pm 0,512$

Значения коэффициентов (таблица 2) и зависимости (рисунок 2, а) показывают, что увеличение температуры теплоносителя ϑ_T и начальной влажности W_0 зерна приводит к возрастанию влагосъема ΔW , а увеличение частоты ω колебаний выпускного аппарата – к уменьшению ΔW . Увеличение влагосъема подтверждает, что для интенсификации сушки температуру ϑ_T необходимо поддерживать на предельно допустимом уровне, обеспечивающем допустимый нагрев зерна.

Влияние начальной влажности W_0 зерна на влагосъем подтверждает теоретическое положение, что зерно большей влажности легче отдает влагу. На влагосъем (рисунок 2, а) большее влияние оказывает начальная

влажность W_0 до 22 %, при больших W_0 влагосъем практически не меняется.

По зависимостям вычислили коэффициент передачи камеры по каналу $W_0 - W$, значение которого изменяется в диапазоне 0,507...0,932 %/%. Это свидетельствует, что камера сглаживает колебания начальной влажности W_0 зерна. При этом большие значения коэффициента соответствуют меньшим ϑ_T и большим ω .

Наибольшее и однозначное влияние на влагосъем ΔW в различных зонах камеры оказывает частота колебаний ω выпускного аппарата (экспозиция сушки), поэтому данный фактор следует использовать для управления влагосъемом.

Наличие значимых коэффициентов при парных взаимодействиях факторов отражает нелинейные связи процесса. Так положительное значение b_{12} при парном взаимодействии ϑ_T и W_0 указывает на увеличение влагосъема при фиксировании их на верхних уровнях. Влагосъем снижается при фиксировании ω на верхнем уровне, а ϑ_T и W_0 на нижних, что подтверждается отрицательным значением коэффициентов b_{13} и b_{23} .

Наибольшее и однозначное влияние на температуру зерна (таблица 3 и рисунок 2, б) во всех зонах камеры оказывает температура теплоносителя ϑ_T , поэтому её следует использовать для управления температурой зерна.

Динамика изменения коэффициента b_1 при факторе ϑ_T показывает, что по мере про-

движения зерна от 2-го ряда коробов к 15-му его влияние на температуру зерна возрастает. Это объясняется понижением в тепловом балансе процесса составляющей, затрачиваемой на испарение влаги при высыхании зерна. С увеличением температуры теплоносителя ϑ_T температура зерна во всех зонах камеры (рисунок 2, б) монотонно возрастает.

Анализ динамики изменения коэффициентов b_2 и b_3 по высоте камеры свидетельствует, что начальная влажность W_0 зерна и частота колебаний ω выпускного аппарата оказывают меньшее и неоднозначное влияние на температуру ϑ_z зерна. Так на уровне 2-го и 4-го ряда коробов с увеличением W_0 температура ϑ_z зерна увеличивается (рисунок 2, б), а на уровне 10-го, 12-го и 15-го ряда происходит её понижение.

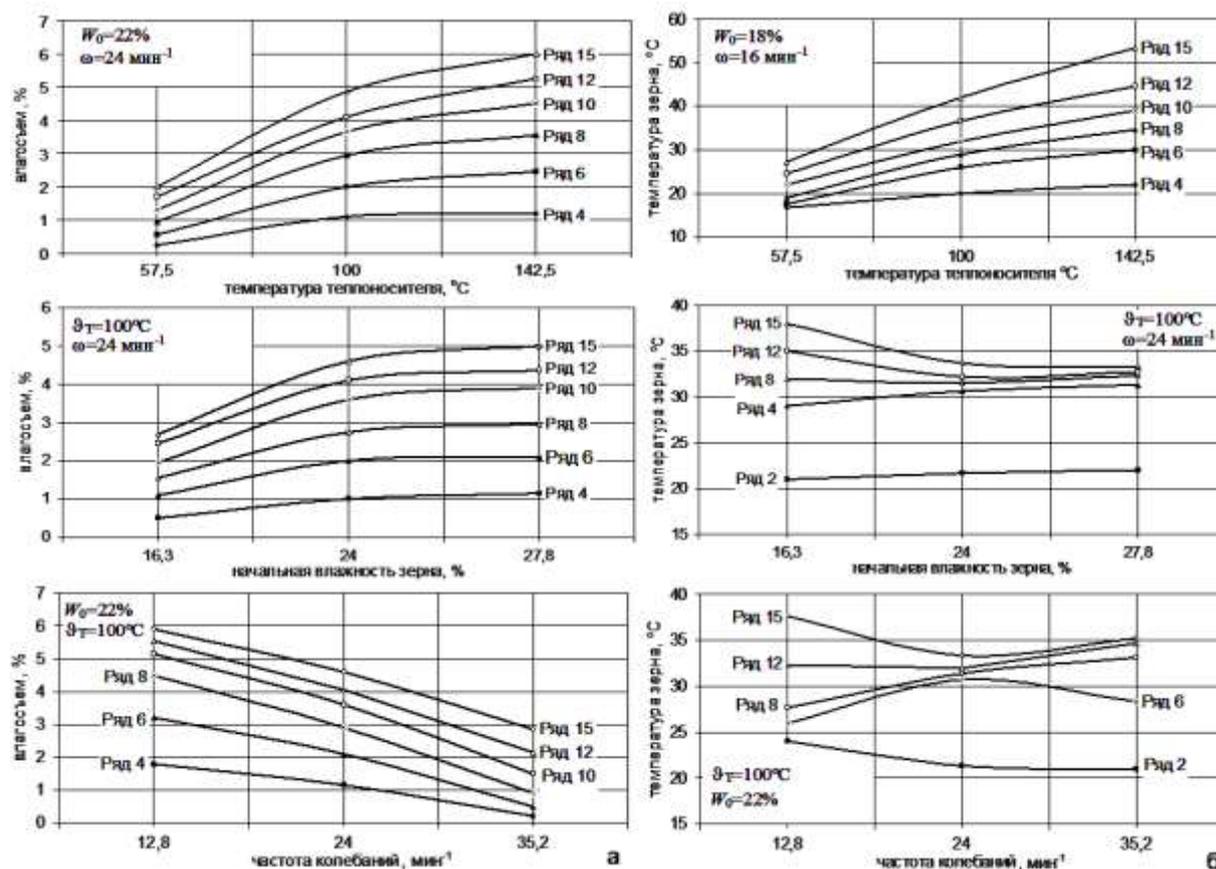


Рисунок 2 – Зависимости влагосъема (а) и температуры зерна (б) от температуры теплоносителя, начальной влажности зерна и частоты колебаний выпускного аппарата

Это связано с одновременным протеканием двух процессов: изменением аэродинамического сопротивления зернового слоя по мере высыхания и постепенным перераспределением составляющих теплового баланса. Так увеличение влажности W приводит к уве-

личению размеров зерновок (вследствие набухания), что вызывает увеличение пористости слоя, и сопровождается снижением его аэродинамического сопротивления. Это ведет к автоматическому увеличению подачи теплоносителя и обуславливает пропорцио-

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ ШАХТНОЙ ЗЕРНОСУШИЛКИ МЕТОДАМИ АКТИВНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

нальное увеличение количества теплоты, подводимой к зерну. В связи с этим повышается его температура в начальных зонах камеры сушки.

По мере снижения влажности W в нижних зонах меняется характер изменения температуры зерна. На процесс перераспределения потоков газа накладывается процесс перераспределения составляющих теплового баланса. Доля теплоты, затрачиваемая на испарение из зерна влаги, уменьшается, но за счет этого прирастает составляющая, затрачиваемая на его нагрев, поэтому температура зерна интенсивно увеличивается. Об этом свидетельствует монотонное возрастание абсолютного значения коэффициента b_2 в нижних зонах камеры.

Динамика изменения по высоте камеры коэффициента b_3 (таблица 3) подтверждает, что на уровне 2-го ряда коробов увеличение ω приводит к снижению температуры ϑ_3 зерна (рисунок 2, б). Это объясняется проявлением тепловой инерционности зернового слоя.

На уровне 4...10 ряда коробов увеличение частоты ω приводит к возрастанию ϑ_3 , что является следствием изменения аэродинамического сопротивления подвижного слоя зерна в зависимости от скорости его переме-

щения по камере. Возрастание скорости сопровождается увеличением работы сил трения между зерновками и уменьшением вследствие этого аэродинамического сопротивления слоя, что ведет к автоматическому увеличению подачи теплоносителя и теплоты в зерновой слой и, как следствие, к повышению его температуры.

Изменение характера влияния частоты ω на ϑ_3 к 15-му ряду коробов объясняется снижением влажности зерна и перераспределением составляющих теплового баланса. Доля теплоты на испарение влаги сокращается, но за счет этого возрастают затраты теплоты на нагрев зерна, поэтому его температура при малых значениях частоты ω интенсивно повышается.

Зависимости на рисунке 3, подтверждающие нелинейное и неоднозначное влияние переменных W_0 и ω на температуру зерна ϑ_3 не только по высоте, но и в отдельных зонах камеры. Этим объясняется то, что в одних зонах изменение переменных W_0 и ω может вызывать положительные приращения температуры зерна, а в других отрицательные, причем значения этих приращений изменяются не только по высоте камеры, но и зависят от значений самих переменных W_0 и ω .

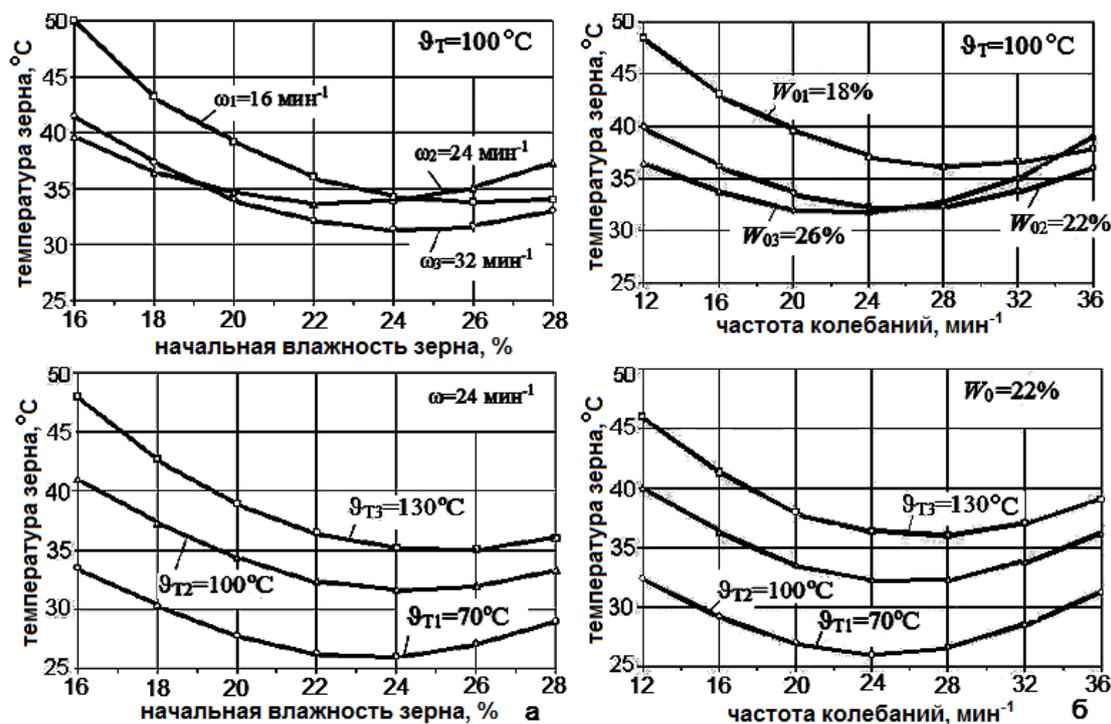


Рисунок 3 – Зависимость температуры зерна от его начальной влажности (а) и частоты колебаний выпускного аппарата (б) на выходе сушилки (15-й ряд коробов)

Из-за неоднозначности влияния использовать экспозицию сушки (частоту ω) для регулирования температуры зерна невозможно.

Наибольших значений приращения температуры зерна достигают в нижнем горизонтальном сечении камеры (15-й ряд коробов), что создает опасность травмирования зерна, причем его больший нагрев соответствует меньшим значениям W_0 и ω .

Варьирование факторов W_0 и ω в области эксперимента (таблица 1) при стабилизированной температуре теплоносителя ведет к изменению температуры зерна в камере в интервале 15 – 20 °С. Из этого следует, что стабилизация температуры теплоносителя не обеспечивает стабилизацию температуры зерна и не исключает возможности его перегрева.

Стабилизация температуры ϑ_T теплоносителя при возможных колебаниях его подачи ведет к колебаниям количества теплоты, подводимой к зерну, что возбуждает колебания температуры зерна. Наиболее целесообразным для повышения стабильности режимов является реализация принципа стабилизации количества теплоты, подаваемой в камеру [11 – 13].

Наличие в уравнениях (1) значимых коэффициентов при парных взаимодействиях факторов и квадратичных членах свидетельствует об их нелинейной связи с температурой ϑ_3 зерна. Так отрицательное значение коэффициента b_{12} (таблица 3) при парном взаимодействии ϑ_T и W_0 свидетельствует об уменьшении температуры зерна, когда ϑ_T

фиксируется на нижнем уровне, а W_0 – на верхнем. Значение коэффициента b_{13} позволяет заключить, что уменьшение температуры зерна на уровне 12-го и 15-го ряда коробов происходит, если ϑ_T зафиксирован на нижнем уровне, а ω – на верхнем. Положительное значение коэффициента b_{23} свидетельствует об увеличении температуры зерна, если W_0 и ω зафиксированы на нижних уровнях.

На зависимостях кинетики нагрева и сушки зерна по высоте камеры (рисунок 4) можно выделить три характерных участка [14]. В верхней зоне (участок А) основная часть теплоты, подведенной теплоносителем к зерну, затрачивается на его нагрев, поэтому температура зерна интенсивно увеличивается. Снижение влажности зерна в зоне незначительно, но скорость сушки dW/dt возрастает. В средней зоне (участок В) большая часть теплоты затрачивается на испарение влаги, скорость сушки достигает максимального значения, поэтому рост температуры зерна замедляется. В этой части камеры снимается большая часть влаги зерна. В нижней зоне (участок С) скорость сушки снижается, поэтому температура зерна возрастает.

Наличие в камере зоны нагрева зерна, в которой практически отсутствует влагосъем, указывает на непроизводительное использование ее рабочего объема. Протяженность зоны достигает 2/5 высоты камеры. Для повышения эффективности использования рабочего объема камеры целесообразно применять предварительный нагрев зерна.

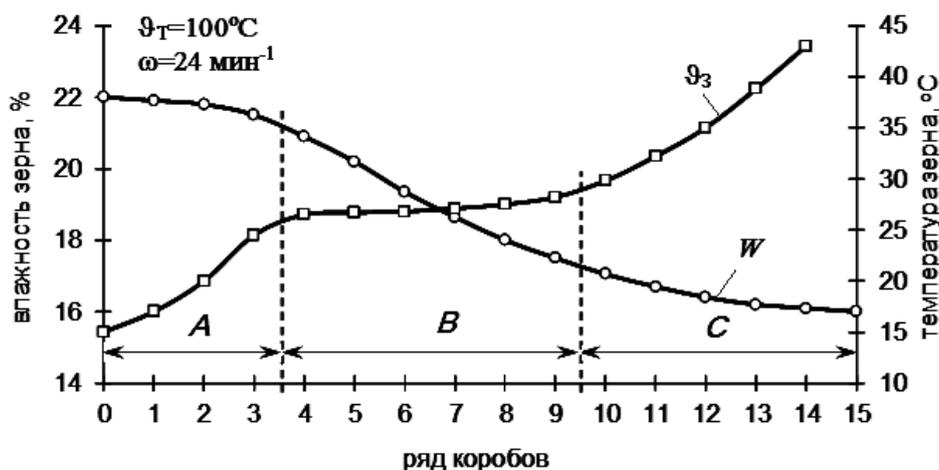


Рисунок 4 – Изменение температуры и влажности зерна по высоте камеры сушки

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ ШАХТНОЙ ЗЕРНОСУШИЛКИ МЕТОДАМИ АКТИВНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

В зоне *B* зависимости отличаются от результатов, получаемых в лабораторных условиях [15]. При сушке в кассетах наблюдается непрерывное повышение температуры зерна в периоде убывающей скорости сушки. В шахтной сушилке заметно проявляются качественные отличия. Они обусловлены наличием подвижного слоя зерна в отличие от неподвижного в лабораторных условиях. Движение зерна совместно с процессом его обезвоживания вызывают заметное изменение физико-механических характеристик зернового слоя в различных зонах камеры.

В верхней зоне, где зерно влажное и размеры зерновок крупнее, аэродинамическое сопротивление слоя меньше. В нижних зонах зерновки уменьшаются в размерах в результате усадки, поэтому аэродинамическое сопротивление слоя больше. Эти процессы обуславливают большую подачу теплоносителя в верхних зонах камеры и меньшую – в нижних. Пропорционально подаче происходит перераспределение теплоты, подводимой к зерну. В верхних зонах ее поступает больше, а в нижних меньше.

Таким образом, на процесс повышения температуры зерна по мере сушки накладывается процесс перераспределения теплоты, приводящий к обратному изменению температуры. В результате их наложения в камере наблюдаются качественно различные картины кинетики нагрева зерна в ее средней зоне.

При низких влажностях зерна ($W_0 < 18\%$) результирующий процесс протекает с преобладающим влиянием повышения температуры, а при средних и высоких влажностях ($W_0 > 20\%$) преобладающее влияние оказывает перераспределение потоков теплоносителя. В этом случае температура зерна может стабилизироваться приблизительно на постоянном уровне или даже снижаться по направлению перемещения зерна вдоль камеры (рисунок 5).

Сушка в средней части камеры происходит при нагреве зерна значительно меньше допустимого, что указывает на резервы ее интенсификации.

В нижней зоне камеры (участок *C*, рисунок 4) сушка характеризуется заметным снижением ее скорости и интенсивным повышением температуры зерна. Его нагрев к выходу из камеры достигает предельно допустимого значения, что в ряде случаев требует уменьшения подвода тепловой энергии. При сосредоточенном способе управления ее подачей, что традиционно реализовывается в шахтных сушилках сельскохозяйственного назначения, это ведет к снижению интенсивности процесса во всех трех зонах ее сушильной камеры. Это противоречие между распределенным объектом и сосредоточенным способом управления его рабочим процессом существенно ограничивает возможности интенсификации сушки.

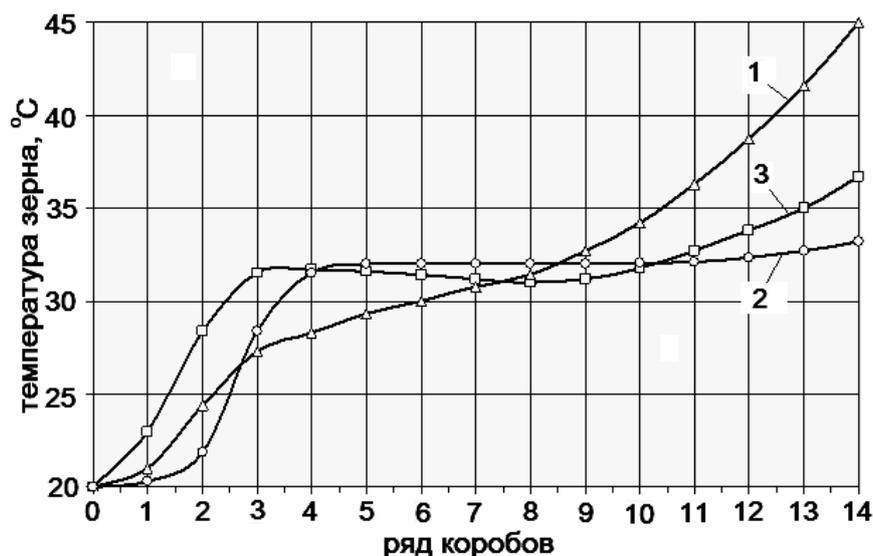


Рисунок 5 – Изменение температуры зерна по высоте камеры сушки: 1 – при $W_0=18\%$, $\vartheta_T=110\text{ }^\circ\text{C}$, $\omega=16\text{ мин}^{-1}$; 2 – при $W_0=22\%$, $\vartheta_T=100\text{ }^\circ\text{C}$, $\omega=24\text{ мин}^{-1}$; 3 – при $W_0=26\%$, $\vartheta_T=130\text{ }^\circ\text{C}$, $\omega=16\text{ мин}^{-1}$

Из-за различия условий зерно в нижнем горизонтальном сечении камеры сушится неравномерно. Отклонение значений влажности зерна в его отдельных точках от среднего достигают $\pm 2,5\%$, а температуры $\pm 9^\circ\text{C}$. Неодинаковый нагрев обуславливает необходимость построения многоточечной системы контроля.

Заранее определить место максимального нагрева зерна в сечении невозможно, что подтверждается неоднозначным влиянием переменных W_0 и ω на температуру зерна (рисунок 3). Изменение переменных W_0 и ω ведет к непрерывному перемещению (дрейфу) зоны максимального нагрева. Это обуславливает необходимость применения поисковых алгоритмов обнаружения зоны максимального нагрева [16 – 21].

Заключение

Полученные данные характеризуют сушилку как распределенную и многосвязную динамическую систему с нелинейными и, а по ряду каналов и неоднозначными связями между переменными состояния ее рабочего процесса. Основным возмущением процесса являются колебания влажности зернового вороха, колебания его начальной температуры существенного влияния на него не оказывают. 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. Для интенсификации рабочего процесса необходимо применять распределенное управление подачей теплоты в камеру сушки и предварительный нагрев зерна.

Список литературы

1. 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.
2. 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.

3. Андрианов, Н. М. Задание начальных условий и стохастической составляющей математической модели процесса сушки зерновых сушилок / Н. М. Андрианов, Шуньчи Мэй и др. // Ползуновский альманах. – 2014. – № 2. – С. 30-35.

4. Андрианов, Н. М. Повышение эффективности функционирования зерновых сушилок / Н. М. Андрианов // Современные наукоемкие технологии. – 2004. – № 2. – С. 175-177.

5. Андрианов, Н. М. Особенности работы зерновых сушилок / Н. М. Андрианов // Техника в сельском хозяйстве. – 2006. – № 4. – С. 9-12.

6. Андрианов, Н. М. Идентификация шахтной зерносушилки в условиях нормальной работы / Н. М. Андрианов, Шуньчи Мэй // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2 (часть 16). – С. 3459-3465.

7. Андрианов, Н. М. Оптимизация зерновых сушилок и их систем управления [Текст] / Н. М. Андрианов // Депонированная рукопись № 197-B2005 10.02.2005 г. – 299 с.

8. Гинзбург, А. С. Исследования процесса рециркуляционной сушки зерна на полупроизводственной сушильной установке / А. С. Гинзбург, В. А. Резчиков и др. // Тр. ВНИИЗ. М., 1975. – Т. 81. – С. 13-23.

9. Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С. В. Мельников, В. Р. Алёшкин, П. М. Роцин. – Л.: Колос, 1980. – 168 с.

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

11. Андрианов, Н. М. Тепловые режимы в шахтных зерносушилках / Н. М. Андрианов, А. Д. Галкин, Шуньчи Мэй и др. // Сельский механизатор. – 2014. – № 9. – С. 12-13.

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

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

14. Андрианов, Н. М. Совершенствование технологического процесса в шахтной зерносушилке / Н. М. Андрианов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2004. – № 7. – С. 7-9.

15. Жидко, В. И. Зерносушение и зерносушилки / В. И. Жидко, В. А. Резчиков, В. С. Уколов. – М.: Колос, 1982. – 240 с.

16. Андрианов, Н. М. Контроль и регулирование температуры зерна в шахтных сушилках / Н. М. Андрианов, Шуньчи Мэй // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – № 8. – С. 9–13.

17. Андрианов, Н. М. Обоснование системы регулирования температуры зерна для сушилок

Ползуновский альманах № 2 2015

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ ШАХТНОЙ ЗЕРНОСУШИЛКИ
МЕТОДАМИ АКТИВНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

шахтного типа / Н. М. Андрианов, Шуньчи Мэй // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 11 (часть 2). – С. 259–265.

18. 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.

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

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

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

Андрианов Николай Михайлович^{1,2} – д. т. н., профессор

Мэй Шунчи² – к. т. н., декан факультета

Сюе Юн² – к. т. н., доцент

¹ *Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого,*

г. Великий Новгород, Россия.

² *Уханьский текстильный университет,*
г. Ухань, Китай.