

ЗАДАНИЕ НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ И СТОХАСТИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА СУШКИ ЗЕРНОВЫХ СУШИЛОК

**Н. М. Андрианов^{1, 2}, Мэй Шунчи², А. В. Николаенок¹,
Ли Джен², Чен Джен²**

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

² Уханьский текстильный университет, г. Ухань, Китай

На основе экспериментальных данных выполнен анализ динамики процессов изменения характеристик потока зернового вороха, поступающего с поля. Установлено, что изменение пропускной способности сушилок обуславливает не стационарность случайных процессов по спектральной плотности. Для учета не стационарности при построении статистических моделей случайных функций необходимо квантовать поток вороха не в интервалах времени, а в интервалах объема. Построена универсальная стохастическая математическая модель, определяющая начальные условия работы сушилок. Модель позволяет имитировать условия работы сушилок независимо от их пропускной способности.

Ключевые слова: зерносушилка, входное воздействие, моделирование

SPECIFYING THE INITIAL CONDITIONS AND THE STOCHASTIC COMPONENT OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE PROCESS OF DRYING GRAIN DRYERS

**N. M. Andrianov^{1, 2}, Mei Shunchi², A. V. Nikolaenok¹,
Li Zhen², Chen Zhen²**

¹ Novgorod State University, Veliky Novgorod, Russia

² Wuhan Textile University, Wuhan, China

Based on experimental data performed the analysis of the dynamics of the processes of changes in the characteristics of the flow of the pile of grain coming from the field. It is established that the change in throughput of dryers is the reason not the stationary of stochastic processes by spectral density. To account for not stationary when building statistical models of random functions, it is necessary to quantize the flow is not in time intervals, and the intervals of the volume. Built universal stochastic mathematical model that determines the initial operating conditions of dryers. The model allows simulating the operating conditions of dryers regardless of their bandwidth.

Keywords: grain dryer, input action, modeling

Введение. Изучение функционирования объектов управления связано с получением информации о процессах взаимодействия их с внешней средой. Входные возмущающие воздействия возбуждают колебания переменных состояния рабочего процесса машин и неизбежно влияют на показатели его эффективности. Статистические характеристики внешних воздействий описывают условия функционирования машин и служат основой для оценки

возможностей их оптимизации, управления и моделирования рациональных режимов в условиях, приближенных к реальным [1].

Процессы на входе в сушилку формируются под влиянием большого числа факторов различной природы, что обуславливает то, что многие из них относятся к классу стохастических. В качестве основных переменных, определяющих условия функционирования сушилки как динамической системы, рас-

ЗАДАНИЕ НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ И СТОХАСТИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА СУШКИ ЗЕРНОВЫХ СУШИЛОК

считывают изменение характеристик потока зернового вороха, к которым относят изменение его влажности, температуры, засоренности и объемной (либо массовой) подачи. В реальных условиях их значения формируются не только в зависимости от изменчивости характеристик вороха, поступающего с поля, но и в зависимости от схемы организации его послеуборочной обработки.

В источниках информации накопилось значительное количество оценок статистических характеристик потока вороха [2], которые в настоящее время служат основой для проектирования зерносушильных комплексов [3]. Однако в подавляющем большинстве случаев это оценки лишь статических характеристик потока, содержащие сведения о его средних значениях, дисперсии и функции распределения вероятности. Оценок динамических характеристик потока, включающих оценки корреляционных функций, функций спектральной плотности и т. п., на много меньше и до настоящего времени они не систематизированы.

Кроме этого сама сушилка оказывает активное влияние на динамику изменения входных воздействий. Ее пропускная способность, зависящая от типоразмера (плановой производительности) и режима работы выгрузного устройства, определяет интенсивность текущей подачи зернового вороха. Однако даже имеющаяся информация о динамике изменения характеристик вороха приводится в источниках [4–13] без оценок его текущей подачи, что не только снижает достоверность результатов, но и затрудняет моделирование режимов с различной пропускной способностью сушилок.

Необходимость усовершенствования методики сбора информации и дополнительного уточнения оценок динамических характеристик входных воздействий сушилок побудили выполнить настоящее исследование.

Цель исследования. Разработка универсальной стохастической модели условий функционирования зерновых сушилок, учитывающей не стационарность характеристик потока зернового вороха по спектральной плотности.

Материал и методы исследования. Анализ случайных функций, характеризующих поток зернового вороха, выполнен с использованием источников информации и на основе данных, полученных экспериментально по уточненной методике, с использованием методов статистической динамики.

Результаты исследования и их обсуждение.

У сушилок разного типа степень влияния

входных возмущающих воздействий на переменные состояния рабочего процесса различна. У шахтных сушилок наибольшее влияние на рабочий процесс оказывают колебания влажности и подачи зернового вороха [16–23], у барабанных – дополнительно учитывают колебания его температуры [24–25]. Влияние засоренности вороха на рабочий процесс сушилок оценить сложно, но она является основным возмущением рабочего процесса зерноочистительных машин. Таким образом, применительно к сушилкам интерес представляют, прежде всего, сведения об изменчивости влажности вороха как основного возмущающего воздействия.

В таблице 1 представлены статистические характеристики процесса изменения влажности потока зернового вороха, полученные в различных регионах. Данные указывают на существенно различный частотный состав спектра колебаний влажности. В работах [4–6] отмечается, что спектр расположен в области низких частот $(0-0,3) \cdot 10^{-3}, \text{с}^{-1}$, в работах [7, 11–13] приводятся сведения, что спектр расположен в области более высоких частот $(1,5-3,5) \cdot 10^{-3}, \text{с}^{-1}$, и лишь в работах [8–9] указывается на существование широкого спектра существенных частот процесса $(0-5,0) \cdot 10^{-3}, \text{с}^{-1}$, охватывающего весь диапазон.

Обобщая данные, можно принять, что спектр основных частот процесса расположен в диапазоне $(0-5,0) \cdot 10^{-3}, \text{с}^{-1}$. Однако противоречивость приведенных сведений обуславливает необходимость дополнительного экспериментального подтверждения действительного спектра частот и объяснения причин столь большой разницы результатов.

Дело в том, что данные (таблица 1) получены в поточных линиях с сушилками разной плановой производительности, однако сведений об их текущей пропускной способности в период проведения эксперимента не приведено. Указано лишь, что пробы зерна для измерения влажности отбирались из потока с квантованием по времени с интервалом, как правило, 3–5 мин.

Для сушилок, работающих с переменной пропускной способностью, случайный процесс изменения влажности зернового вороха, безусловно, является нестационарным по спектральной плотности. Поэтому методика построения его модели без учета действительной (текущей) пропускной способности сушилки не корректна. Такой подход не позволяет учесть не стационарность процесса по спектральной плотности и обуславливает низкую достоверность полученных результатов.

Таблица 1 – Статистические характеристики случайного процесса изменения влажности потока зернового вороха, поступающего в сушилку в течение суток

№ п/п	Плановая производительность сушилки, т/ч	Среднее квадратическое отклонение, σ_w , %	Интервал корреляции, ρ_w , мин ⁻¹	Диапазон существенных частот, f , с ⁻¹ ·10 ⁻³	Зона проведения опытов и источник информации
1	20	2,2–4,5	20–90	0–0,157	Омская и Целиноградская области [4]
2	2	0,4–2,7	40–80	0–0,3	Московская область [5]
3	2	0,8–2,5	–	0–0,3	Московская, Пензенская, Целиноградская области [6]
4	16	0,76–2,5	102–140	0,09–1,15	Ленинградская, Московская, Минская области [7]
5	16	0,9–2,2	25–43	0–5,0	Ленинградская область [8]
6	2	0,8–3,5	4–128	0–4,0	Ленинградская область [9]
7	16	2,58–2,91	–	–	Ленинградская область [10]
8	4	2,5–3,5	60–80	2,1–3,5	Ленинградская область [11]
9	2, 16	2,0–4,0	–	0–2,0	Ленинградская и Московская области [12]
10	16	0,7–2,6	25–60	0–3,5	Ленинградская область [13]
Обобщенные данные		0,8–4,0	4–140	0–5,0	Для условий Северо-Западной зоны

При работе сушилки с переменной пропускной способностью для учета не стационарности процесса по спектральной плотности квантование потока необходимо осуществлять не в интервалах времени Δt , а в интервалах объема ΔV либо массы вороха, поступающего в камеру сушки. Наиболее просто квантование потока реализуется в интервалах объема.

Уточненная методика была использована при экспериментальных исследованиях потока зернового вороха, поступающего в сушилку в течение суток. Информация об условиях функционирования сушилок собиралась в хозяйствах Новгородской и Ленинградской области в период с 1990 по 2003 гг. при поступлении на сушку различных зерновых культур: рожь, ячмень, пшеница, овес [13–17]. В целях выявления наиболее полной картины возможных изменений входных воздействий, технологическая схема организации процесса обработки зерна, в ходе исследований перестраивалась в возможном диапазоне. Исследования проводились при поступлении вороха в сушильную камеру как непосредственно от комбайнов, так и из бункеров активного вентилирования после временного хранения и подсушки. Однако в любом случае схема предусматривала предварительную очистку зерна.

Методика сбора и обработки информации предусматривала построение универсальной модели, способной учесть не стационарность

исследуемых процессов по спектральной плотности. Для этого реализации случайных функций изменения параметров потока зернового вороха квантовались не в единицах времени, а в единицах объема, то есть поток вороха разбивался на равные по объему части, последовательно поступающие на обработку, и отбор проб производился из каждой из них [14–15]. На основании априорных данных определен интервал квантования, обеспечивающий получение информации о составе наиболее высоких частот колебаний случайных функций [1], который составил 0,13 м³. Объем реализаций не ограничивали. Всего получено 37 реализаций влажности, 7 температуры и 12 засоренности зернового вороха с количеством проб от 110 до 332.

Результаты обработки реализаций подтвердили, что случайные функции влажности и температуры вороха в течение смены в основном стационарны по дисперсии и нестационарны по математическому ожиданию. Не стационарность функций по математическому ожиданию наблюдается преимущественно в утренние и вечерние часы, что связано, по-видимому, с изменением влажности и температуры окружающего воздуха, выпадением росы. В периоды выпадения атмосферных осадков также наблюдалась не стационарность. Изменение текущего среднего значения влажности вороха в течение смены достигало 2–5 %, а температуры 1–4 °С.

ЗАДАНИЕ НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ И СТОХАСТИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА СУШКИ ЗЕРНОВЫХ СУШИЛОК

Большинство выборочных оценок функции плотности распределения вероятности указанных случайных величин после устранения тренда оказались близки к нормальному закону распределения. Коэффициент эксцесса для большинства реализаций изменялся в интервале от 2,33 до 4,41, а коэффициент асимметрии – от –0,71 до 0,84. Во всех случаях критерий согласия χ^2 выборочной плотности распределения нормальному закону оказался меньше критического значения при уровне значимости 0,95.

Результаты вычисления статистических характеристик потока зернового вороха представлены в таблице 2: где m – выборочные средние; σ – среднеквадратические отклонения выборок; v – коэффициенты вариации выборок; τ – интервалы корреляции случайных функций; f – диапазоны их существенных частот. В качестве примера, в таблице приведены значения оценок динамических характеристик случайных функций (τ , мин.; f , с^{-1}) пересчитанные для потока с массовой подачей 10 т/час.

Таблица 2 – Оценки статистических характеристик зернового вороха на входе в сушильную камеру

Характеристики вороха	m %	σ %	v %	τ		f	
				м^3	мин.	м^{-3}	$\text{с}^{-1} \cdot 10^{-3}$
Влажность сезоны 1990–2003 гг.	13,2–29,2	0,4–2,6	3,6–10,9	0,9–6,0	4,1–27,5	0–9,3	0–7,2
Температура сезоны 1999–2002 гг.	9,9–8,1	0,4–2,5	4,5–20,9	3,9–8,9	18,0–40,1	0–6,2	0–4,1
Засоренность сезоны 1998–2001 гг.	0,5–5,5	0,4–1,2	19,6–42,1	0,91–5,2	4,1–23,4	0–10,1	0–8,0

Таблица 3 – Значения параметров уравнения, аппроксимирующего усредненную оценку нормированной корреляционной функции $\rho_w(V)$

Параметр уравнения	A_1	A_2	$\alpha_1, \text{м}^{-3}$	$\alpha_2, \text{м}^{-3}$	$\Omega, \text{рад/м}^3$
Числовое значение	1,3	–0,3	1,731	0,292	0,246

Представительная оценка корреляционной функции изменения влажности вороха получена в результате усреднения оценок вычисленных по ансамблю реализаций. В таблице 3 представлен результат аппроксимации усредненной оценки нормированной корреляционной функции выражением вида

$$\rho_w(V) = A_1 \cdot e^{-\alpha_1 |V|} + A_2 \cdot e^{-\alpha_2 |V|} \cdot \cos \Omega \cdot |V|; A_1 + A_2 = 1,$$

где $V = V_1 - V_2$ сдвиг между сечениями случайной функции в единицах объема, м^3 ; A_1 и A_2 – составляющие дисперсии случайной функции; α_1 и α_2 – коэффициенты затухания, м^{-3} ; Ω – угловая частота, рад/м^3 .

Необходимо обратить внимание, что в оценках параметров уравнения (таблица 3) используются не единицы времени, а единицы объема. Тем самым достигается универсальность модели условий функционирования сушильной камеры, так как её параметры не зависят от значения массовой или объемной подачи зернового вороха в сушильную камеру и плановой производительности сушилки.

При необходимости моделирования случайного процесса изменения влажности вороха $W(t)$ на входе в сушильную камеру с заданной объемной подачей аргумент V модели должен быть преобразован в аргумент t с использованием выражения $G_V = V/t$. Здесь G_V – объемная подача вороха, $\text{м}^3/\text{с}$; $t = t_1 - t_2$ – сдвиг между сечениями случайного процесса, с.

На рисунке 1, в качестве примера, приведены усредненные оценки нормированных динамических характеристик случайного процесса $W(t)$, построенные при массовой подаче зернового вороха в сушильную камеру 10 т/ч. Из них следует, что частота f_0 , на которой наблюдается максимум дисперсии процесса, составляет $f_0 = 0,0007 \text{ с}^{-1}$, а верхняя граничная частота (частота среза, отсекающая 95 % дисперсии) может быть принята равной $f_b = 0,0066 \text{ с}^{-1}$. Интервал корреляции процесса $\tau_k = 1500 \text{ с}$.

Взаимной корреляции процессов изменения температуры, влажности и засоренности зернового вороха на входе в сушильную камеру не обнаружено.

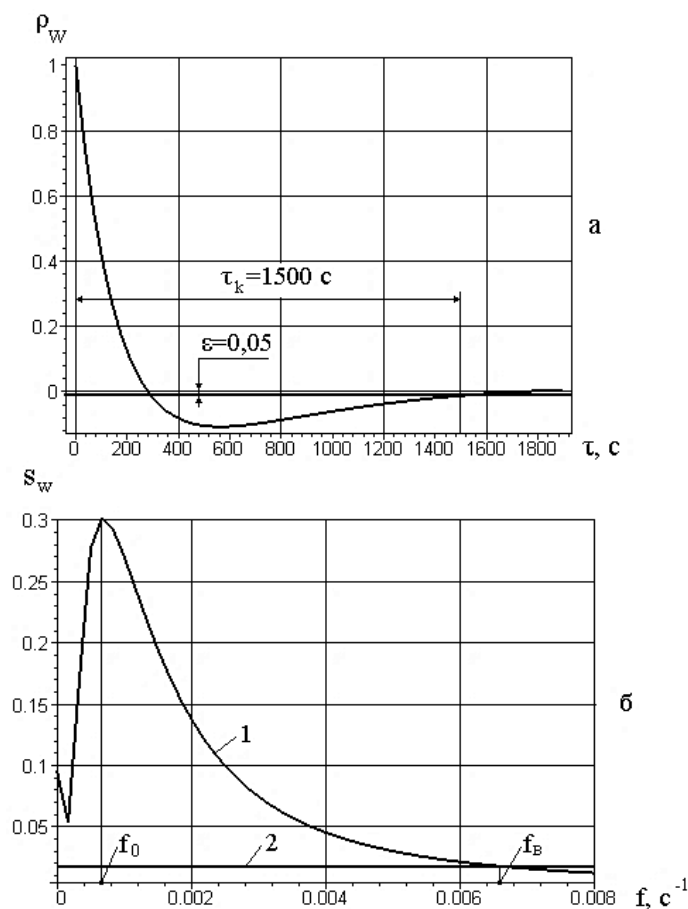


Рисунок 1 – Усредненные оценки нормированной корреляционной функции (а) и спектральной плотности (б) случайного процесса $W(t)$, приведенные к массовой подаче зернового вороха 10 т/ч

Выводы.

1. Установлено, что вследствие изменения пропускной способности сушилок случайные процессы изменения параметров потока зернового вороха, поступающего в них в течение суток, не стационарны по спектральной плотности. Для учета не стационарности при построении статистических моделей случайных функций квантование потока вороха необходимо осуществлять не в интервалах времени, а в интервалах объема либо массы.

2. По экспериментальным данным построена универсальная стохастическая модель возмущающего воздействия, позволяющая задавать начальные условия функционирования на входе математической модели процесса сушки в сушильной камере зерновых сушилок, работающих с любой заданной пропускной способностью.

Список литературы

1. Лурье, А. Б. Статистическая динамика сельскохозяйственных агрегатов [Текст] / А. Б. Лурье. – Л.: Колос, 1970. – 376 с.

2. Киреев, М. В. Послеуборочная обработка зерна в хозяйствах [Текст] / М. В. Киреев. – Л.: Колос, 1981. – 224 с.

3. НТП 16-93. Нормы технологического проектирования предприятий послеуборочной обработки и хранения продовольственного фуражного зерна и семян зерновых, зернобобовых, масличных культур и трав. – М., 1999. – 48 с.

4. Пузанков, А. Г. К вопросу об управлении режимами работы зерноочистительных машин [Текст] / А. Г. Пузанков // Тракторы и с.-х. машины. – 1967. – № 1. – С. 19–22.

5. Елизаров, В. П. Условия послеуборочной обработки в Центральной нечернозёмной зоне [Текст] / В. П. Елизаров // Тр. ВИМ. – М., 1974. – Т. 65. – Ч. 1. – С. 107–115.

6. Краусп, В. Р. Автоматизация послеуборочной обработки зерна [Текст] / В. Р. Краусп. – М.: Машиностроение, 1975. – 278 с.

7. Бекеев, А. Х. Выбор оптимального соотношения производительности зерносушилки и машины первичной очистки поточной послеуборочной обработки зерна [Текст]: Автореф. дисс. канд. техн. наук. – М., 1979. – 17 с.

8. Александров, А. И. Анализ и синтез много-связной системы автоматического управления

ЗАДАНИЕ НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ И СТОХАСТИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА СУШКИ ЗЕРНОВЫХ СУШИЛОК

процессом сушки в шахтных зерносушилках [Текст]: Автореф. дисс. канд. техн. наук. – Минск, 1982. – 16 с.

9. Эрк, А. Ф. Колебания влажности зерна и семян трав, поступающих на послеуборочную обработку в течение суток [Текст] / А. Ф. Эрк // Повышение эффективности использования средств механизации земледелия в НЗ РСФСР: Тр. НИПТИМЭСХ НЗ РСФСР. – Л., 1983. – С. 113–116.

10. Керимов, М. А. Оценка условий и качества функционирования зерновых сушилок [Текст] / М. А. Керимов // Автоматизация процессов послеуборочной обработки зерна: Тр. ЛСХИ. – Л., 1985. – С. 70–74.

11. Колесов, Л. В. Статистические исследования факторов, влияющих на процесс сушки зерна [Текст] / Л. В. Колесов // Тр. ЛСХИ. – Л., 1977. – Т. 312. – С. 58–63.

12. Гуляев, Г. А. Уровень автоматизации и структура систем автоматического управления процессами сушки и очистки зерна в поточных линиях [Текст] / Г. А. Гуляев // Тр. ВИМ. – М., 1974. – С. 177–200.

13. Колесов, Л. В. Исследование шахтной зерносушилки в условиях нормального функционирования [Текст] / Л. В. Колесов, Н. М. Андрианов // Интенсификация технологических процессов в растениеводстве: Сб. науч. трудов ЛГАУ. – Л., 1991. – С. 47–55.

14. Андрианов, Н. М. Исследование характеристик зернового вороха [Текст] // Ученые записки Академии сельского хозяйства и природных ресурсов НовГУ. – Великий Новгород: ЦНТИ, 2000. – в. 1. – С. 19–22.

15. Андрианов, Н. М. Построение математической модели условий функционирования зерновых сушилок [Текст] / Н. М. Андрианов // Автоматизация: Проблемы, идеи, решения: материалы Международной научно-технич. конф.: 15–17 октября 2007 г. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2007. – С. 33–36.

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

17. Андрианов, Н. М. Повышение эффективности функционирования зерновых сушилок [Текст] / Н. М. Андрианов // Современные наукоемкие технологии. – 2004. – № 2. – С. 175–177.

18. Андрианов, Н. М. Особенности работы зерновых сушилок [Текст] / Н. М. Андрианов // Техника в сельском хозяйстве. – 2006. – № 4. – С. 9–12.

19. Андрианов, Н. М. Совершенствование технологического процесса в шахтной зерносушилке [Текст] / Н. М. Андрианов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2004. – № 7. – С. 7–9.

20. Андрианов, Н. М. Контроль и регулирование температуры зерна в шахтных сушилках [Текст] / Н. М. Андрианов // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – № 8. – С. 9–13.

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

22. Андрианов, Н. М. Исследование шахтной зерносушилки как объекта управления [Текст] / Н. М. Андрианов // Успехи современного естествознания. – 2004. – № 9. – С. 86–91.

23. Андрианов, Н. М. Обоснование системы стабилизации потока теплоты для зерносушилок шахтного типа [Текст] / Н. М. Андрианов // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 8 – Ч. 7. – С. 1518–1523.

24. Андрианов, Н. М. Выбор режимов сушки зерна [Текст] / Н. М. Андрианов // Сельский механизатор. – 2011. – № 8. – С. 8–9.

25. Андрианов, Н. М. Оптимизация технологических режимов барабанных зерносушилок [Текст] / Н. М. Андрианов // Известия ТулГУ. Серия: Технические науки. – 2010. – Вып. 3 – С. 201–206.

Андрианов Николай Михайлович^{1, 2} – д.т.н., профессор; e-mail: Nikolay.Andrianov@novsu.ru
Мэй Шунчи² – к. т.н., декан факультета механики и автоматики

Николаенок Андрей Валентинович¹ – аспирант, инженер
Чен Джен² – магистр, инженер
Ли Джен² – магистр, инженер

¹ ФГБОУ ВПО «Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого», г. Великий Новгород, Россия.

² Уханьский текстильный университет, г. Ухань, Китай