

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА
ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗЕРНОВОГО СЫРЬЯ**

М. В. Чкалова, В. Д. Павлидис, О. А. Капустина

**DETERMINATION OF PARAMETERS AND CHARACTERISTICS
OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE PROCESS
OF GRAIN RAW STUFF CRUSHING**

M. V. Chkalova, V. D. Pavlidis, O. A. Kapustina

Аннотация. *Актуальность и цели.* Целью работы является получение параметра, характеризующего гранулометрический состав воздушно-продуктового слоя (ВПС) и определение конкретных числовых выражений корреляционных функций и спектральных плотностей, однозначно описывающих поведение ВПС в рабочей камере измельчителя. *Материалы и методы.* Анализ и верификация модели измельчения зернового сырья проводились с использованием авторских методик определения величины ударного импульса видов частиц и обработки опытных данных на запатентованной лабораторной установке «Центробежно-ударная мельница». *Результаты.* Авторами установлены закономерности изменения параметров исследуемой модели, дающие возможность управления ВПС и регулирования однородности выходного продукта. *Выводы.* В результате проведения исследований достоверно установлено, что величина ударного импульса есть параметр модели, однозначно характеризующий дисперсный состав ВПС; определены числовые значения передаточных функций изучаемых динамических систем; верифицирована математическая модель измельчения зернового сырья.

Ключевые слова: измельчение, воздушно-продуктовый слой, величина ударного импульса, гранулометрический состав, корреляционная функция, передаточная функция, динамическая система.

Abstract. *Background.* The purpose of the research was to obtain the parameters, characterizing the granulometric composition of the air-product layer (APL) and to determine definite numerical expressions of correlation functions and spectral densities, exactly describing the behavior of the APL in the working chamber of the crusher. *Materials and methods.* The analysis and verification of the grain raw stuff crushing model was carried out using the author's methods for determining the magnitude of the impact pulse of various particles. The experimental data obtained were processed on the patented laboratory installation "centrifugal-impact mill". *Results.* As result of studies conducted the authors have established the principles of the above model parameters changing, which make it possible to control the APL and regulate the homogeneity of the output product. *Conclusions.* As a result of research, it is reliably established that the magnitude of the shock pulse is a parameter of the model that uniquely characterizes the dispersed composition; the numerical values of the transfer functions of dynamical systems under study are determined; the mathematical model of grinding of grain raw materials is verified.

Key words: crushing, air-product layer, impact pulse magnitude, ganulometric composition, correlation function, transfer function, dynamic system.

Введение

Базовым элементом системы развития современного сельскохозяйственного производства, в том числе и кормоприготовления как важнейшей из его отраслей, является переход к инновационным моделям, адекватно описывающим реально протекающие процессы.

Технологии производства кормов должны в полной мере удовлетворять критериям энерго- и ресурсосбережения. Основой улучшения качества выходного продукта и снижения энергозатрат может служить моделирование процессов кормоприготовления, удовлетворяющее требованиям общности, универсальности и информационной емкости. Комплексная разработка практических решений, экономически выгодных для хозяйств любой формы собственности, не будет обеспечена без учета возможностей управления реально протекающими технологическими процессами и регулирования их параметров.

Наиболее широкие перспективы, по мнению авторов, открывает стохастическое моделирование реальных процессов кормоприготовления, что подтверждается результатами теоретических и экспериментальных исследований процесса измельчения зернового сырья.

Анализ внутренней структуры процесса измельчения зернового сырья подтвердил неравномерность свойств [1–3] воздушно-продуктового слоя (ВПС) в разных частях рабочей камеры стандартного измельчителя (молотковой дробилки закрытого типа). Всестороннее изучение поведения ВПС и факторов, влияющих на эффективность процесса измельчения, позволило выдвинуть гипотезу о наличии внутри рабочей камеры измельчителя условных зон относительной равномерности слоя и относительной стабильности его характеристик, которые связаны с конструктивными особенностями рабочей камеры. Были выделены зона входной горловины α , зона нижней деки β_1 , зона решета γ , зона верхней деки β_2 .

Процесс, протекающий в рабочей камере при установившемся режиме работы, рассматривался как непрерывный случайный процесс размножения (измельчения) и гибели (переизмельчение, уход через решето) частиц (зерновок) некой исходной совокупности. Этот случайный процесс, обозначенный $X(t)$, был классифицирован как марковский процесс гибели и размножения с дискретными состояниями и непрерывным временем [3].

Под состоянием будем понимать полученное в конкретный момент времени (соответствующий данному состоянию) число частиц, среди которых есть готовые к дальнейшему размножению и к гибели. В установившемся режиме работы дробилки исследуемый случайный процесс $X(t)$ является стационарным и обладает эргодическим свойством (нет состояний без выхода и без входа).

В установившемся режиме работы измельчителя свойства ВПС, следовательно, и его характеристики претерпевают значительные изменения при переходе через границы условных зон, но в каждой условной зоне ВПС ведет себя относительно стабильно [1–3]. Таким образом, процесс размножения и гибели частиц ВПС в разных зонах будет протекать со своими особенностями, а интенсивности процессов размножения и гибели в пределах одной зоны

будут оставаться постоянными, что должно найти отражение в модели процесса измельчения.

Рассмотрим влияние граничных эффектов на характеристики ВПС. Общий случайный процесс гибели и размножения $X(t)$ разделим на составляющие, соответствующие условным зонам $X_1(t)$, $X_2(t)$, $X_3(t)$, $X_4(t)$, и рассмотрим две соседние условные зоны, разделенные границей.

Достаточно малую окрестность границы будем считать динамической системой, входным воздействием для которой служит случайный процесс $X_i(t)$, а реакцией на выходе является случайный процесс $X_{i+1} = j(t)$. Каждый случайный процесс $X_i(t)$ ($i = 1, 2, 3, 4$), как и общий процесс в рабочей камере, обладает эргодическим свойством, так как протекает однородно и множество состояний его конечно. Следовательно, любая реализация процесса достаточно большой продолжительности может заменить собой всю возможную совокупность реализаций, что будет иметь большое практическое значение в ходе проведения экспериментов и последующей обработки опытных данных.

Преобразование стационарного случайного процесса $X_i(t)$ стационарной динамической системой зададим линейным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами [4, 5]:

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n}{dt^n} X_j(t) + a_{n-1} \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} X_j(t) + \dots + a_1 \frac{d}{dt} X_j(t) + a_0 X_j(t) = \\ = b_m \frac{d^m}{dt^m} X_i(t) + b_{m-1} \frac{d^{m-1}}{dt^{m-1}} X_i(t) + \dots + b_1 \frac{d}{dt} X_i(t) + b_0 X_i(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где $X_i(t)$ – стационарный процесс на входе; $X_j(t)$ – стационарный процесс на выходе.

Запишем уравнение в операторной форме:

$$A_n(p, t), X_j(t) = B_m(p, t) X_i(t). \quad (2)$$

Следовательно, процесс измельчения в рабочей камере может быть описан операторным уравнением (2), однако с точки зрения практической применимости этот процесс удобнее описать с помощью системы передаточных функций:

$$\begin{cases} G(i\omega)_{1 \rightarrow 2}; \\ G(i\omega)_{2 \rightarrow 3}; \\ G(i\omega)_{3 \rightarrow 4}; \\ G(i\omega)_{4 \rightarrow 1}. \end{cases}$$

Таким образом, система передаточных функций

$$|G(i\omega)_{i \rightarrow i+1=j}|^2 = \frac{\tilde{s}_x^{*j}(\omega)}{\tilde{s}_x^{*i}(\omega)},$$

где $\tilde{s}_x^{*i}(\omega)$, $\tilde{s}_x^{*j}(\omega)$ – эмпирические оценки соответствующих спектральных плотностей [6], определяет математическую модель процесса измельчения зернового сырья в рабочей камере, а моделями поведения ВПС в условных

зонах измельчителя будет служить система корреляционных функций $\tilde{k}_x^1(\tau)$, $\tilde{k}_x^2(\tau)$, $\tilde{k}_x^3(\tau)$, $\tilde{k}_x^4(\tau)$ вида

$$k_x(\tau) = 2\alpha^2(2\cos\beta\tau - 1) \frac{\sin\beta\tau}{\tau}. \quad (3)$$

Полученная стохастическая модель процесса измельчения зернового сырья учитывает все многообразие факторов, влияющих на эффективность процесса, и позволяет не рассматривать воздействие каждого фактора в отдельности.

Постановка задачи

На основании дискретизированных данных лабораторных и производственных экспериментов охарактеризуем процесс измельчения зернового сырья в рабочей камере молотковой дробилки системой численных параметров, покажем перспективы управления процессом и установим возможности регулирования его внутренней структуры, а также выделим наиболее практически значимые факторы, влияющие на эффективность управления реальным процессом измельчения.

Методика определения численной характеристики структурных составляющих воздушно-продуктового слоя

Задачи исследования внутренней структуры процесса в рабочей камере стандартного измельчителя (молотковой дробилки) потребовали особенной характеристики, обладающей универсальностью, четкостью, точностью и информативностью. Теоретический анализ и серия экспериментов на патентованной лабораторной установке «Центробежно-ударная мельница» [7–9] позволили получить такую характеристику, как величина ударного импульса каждого вида частиц в потоках «размножающихся» (дробящихся) и «гибнущих» (уходящих через решето, переизмельченных) частиц ВПС.

Эта характеристика является универсальной, так как «свободна» от всех внешних влияний (техническое устройство измельчителя, технологические и иные условия протекания процесса, вид и качество исходного сырья). Вместе с тем она является четкой и точной, так как соответствует каждому виду частиц и может быть получена в любом сечении ВПС, обладает свойством информативности, поскольку реагирует на любые изменения в ходе конкретной реализации случайного процесса.

В каждой условной зоне рабочей камеры молотковой дробилки устанавливались датчики авторской конструкции, способные воспринимать воздействие ВПС. Схема расположения датчиков внутри рабочей камеры обуславливалась требованием полноты информации во всех зонах: впускная горловина (α), нижняя дека (β_1), решето (γ), верхняя дека (β_2) (рис. 1).

В качестве материала измельчения использовали зерновой материал средней сухости: ячмень сорта «Донецкий-8», пшеницу мягкую сорта «Саратовская-42», рожь сорта «Саратовская-7». В результате проведения экспериментов с использованием лабораторной установки «центробежно-ударная мельница» [7–9] и пьезодатчиков авторской конструкции были получены ос-

циллограммы величины сигнала от датчиков для «погибших частиц» и целых зерновок, соответствующие условным зонам рабочей камеры молотковой дробилки. При анализе была выделена среднемасштабная составляющая сигнала посредством полосовой фильтрации на основе последовательного скользящего усреднения.

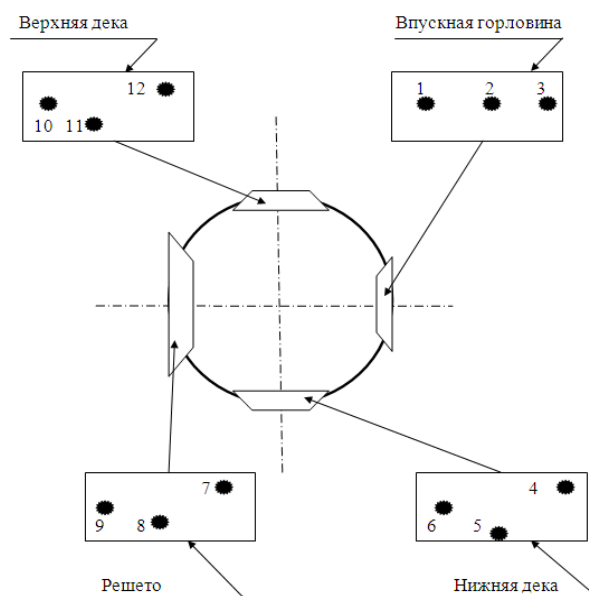


Рис. 1. Схема установки датчиков в рабочей камере молотковой дробилки

В программе «Электронный осциллограф» сигнал автоматически дискретизировался и полученные таким образом дискретные значения величины ударного импульса соответствующих видов частиц подвергались дальнейшей статистической обработке. Методом доверительных интервалов по сериям экспериментов были установлены границы интервалов значений величины ударного импульса «погибших» частиц и целых зерновок. Полученные статистические оценки границ интервалов величины ударного импульса по видам частиц (табл. 1) сопоставлялись с дискретизированными данными производственных экспериментов.

Таблица 1

Интервалы значений величины ударного импульса различных видов частиц по условным зонам (полная загрузка дробильной камеры)

Виды частиц	Зона входной горловины α	Зона нижней деки β_1	Зона решета γ	Зона верхней деки β_2
Целые зерновки	7850–30000*	9500–30000	16400–30000	18300–30000
«Размножающиеся» частицы	2300–7850	6350–9500	11950–16400	13500–18300
«Погибшие» частицы: переизмельченные готовый продукт	0–1600 1600–2300	0–4500 4500–6350	0–6400 6400–11950	0–12000 12000–13500

П р и м е ч а н и е. * – значения величины ударного импульса, мкВ.

Оценки границ интервалов «размножающихся» частиц составлены методом исключения и имеют вид

$$R^+(0; \varepsilon_1)U(\varepsilon_2; 30000),$$

где $(0; \varepsilon_1)$ – интервал «погибших» частиц; $(\varepsilon_2; 30\,000)$ – интервал целых зерновок.

Таким образом, получен безусловный параметр, который с достаточной статистической точностью (не требующей специальных оценок вычислительных погрешностей) четко соответствует видам частиц ВПС.

*Определение фракционного состава ВПС по условным зонам
в режиме реального времени*

В ходе производственных экспериментов показания датчиков дискретизировались, сглаживались инструментом Moving Average для получения более отчетливого представления об основной тенденции и передавались в программные среды Mathcad и Excel для дальнейшей обработки. Рассматривались показания датчиков, установленных в центральной части каждой условной зоны, поскольку датчики, расположенные ближе к границам, реагировали на влияние соседних зон.

На обработанные и ранжированные данные накладывались интервалы значений величины ударного импульса для «погибших», «размножающихся» частиц и целых зерновок. В результате удалось получить процентные соотношения видов частиц («погибших», «размножающихся» и целых) в совокупном значении величины ударного импульса для каждой условной зоны в режиме реального времени (табл. 2). Таким способом может быть определен фракционный состав ВПС в разных частях рабочей камеры молотковой дробилки. Изменение вклада каждого вида частиц в совокупном импульсе по условным зонам наглядно иллюстрируют данные табл. 2.

Таблица 2

Процентные соотношения различных видов частиц
по условным зонам (полная загрузка дробильной камеры)

Виды частиц	Условные зоны дробильной камеры			
	Зона входной горловины α	Зона нижней деки β_1	Зона решета γ	Зона верхней деки β_2
Целые зерновки	57 %	44 %	23 %	32 %
«Размножающиеся» (дробящиеся)	35 %	45 %	23 %	32 %
«Погибшие» (готовый продукт)	3 %	6 %	41 %	27 %
«Погибшие» (переизмельченные)	5 %	5 %	13 %	9 %

Их анализ позволяет нам сделать вывод о том, что соотношения видов частиц по зонам остаются примерно постоянными при многократной циркуляции ВПС и работе измельчителя в установившемся режиме, а это подтверждает универсальность введенного параметра.

Определение характеристик случайного процесса и параметров моделей при полной загрузке рабочей камеры

Реализация случайного процесса в каждой условной зоне рабочей камеры (осциллограмма показаний конкретного датчика) на достаточно длительном промежутке времени вполне подходила для определения характеристик процесса. Одна такая реализация достаточной продолжительности по объему информации практически эквивалентна множеству реализаций той же общей продолжительности, а это позволило характеристики случайной функции определять не как средние по множеству наблюдений, а как средние по времени.

Для того, чтобы математическое ожидание m_x^i и корреляционная функция $k_x^i(\tau)$ (где $i = 1-12$ – номера установленных датчиков) были определены с удовлетворительной точностью, дискретных данных должно быть порядка сотни.

При этом обязательно должен быть учтен частотный состав колебаний, образующих случайную функцию [4, 5]. Программа «Электронный осциллограф», которая использовалась для записи показаний датчиков, автоматически осуществляла выбор опорных точек и длину промежутка времени, ориентируясь на характер изменения случайной функции.

Характеристики случайных процессов в каждой условной зоне (табл. 3) были получены как результат статистической обработки реализаций соответствующих датчиков в среде MathCAD. Таким же образом определялись экспериментальные значения корреляционных функций.

Таблица 3

Характеристики случайного процесса в каждой условной зоне

Характеристики случайного процесса	Зона входной горловины α			Зона нижней деки β_1		
	Датчик 1	Датчик 2	Датчик 3	Датчик 4	Датчик 5	Датчик 6
m_x^i	$8,377 \cdot 10^3$	$9,116 \cdot 10^3$	$8,845 \cdot 10^3$	$1,04 \cdot 10^4$	$1,066 \cdot 10^4$	$1,007 \cdot 10^4$
D_x^i	$2,216 \cdot 10^7$	$2,76 \cdot 10^7$	$1,803 \cdot 10^7$	$1,73 \cdot 10^7$	$1,06 \cdot 10^7$	$2,237 \cdot 10^7$
σ_x^i	$4,708 \cdot 10^3$	$5,253 \cdot 10^3$	$4,246 \cdot 10^3$	$4,16 \cdot 10^3$	$3,255 \cdot 10^3$	$4,73 \cdot 10^3$
Характеристики случайного процесса	Зона решета γ			Зона верхней деки β_2		
	Датчик 7	Датчик 8	Датчик 9	Датчик 10	Датчик 11	Датчик 12
m_x^i	$9,705 \cdot 10^3$	$1,216 \cdot 10^4$	$8,789 \cdot 10^3$	$1,026 \cdot 10^4$	$1,224 \cdot 10^5$	$1,022 \cdot 10^4$
D_x^i	$2,394 \cdot 10^7$	$5,064 \cdot 10^7$	$2,419 \cdot 10^7$	$2,234 \cdot 10^7$	$4,311 \cdot 10^9$	$5,365 \cdot 10^6$
σ_x^i	$4,892 \cdot 10^3$	$7,116 \cdot 10^3$	$4,919 \cdot 10^3$	$4,727 \cdot 10^3$	$6,566 \cdot 10^4$	$2,316 \cdot 10^3$

Незакономерные колебания экспериментальных корреляционных функций $k_x^i(\tau)$ сглаживала аналитическая функция следующего вида:

$$k_x(\tau) = 2a^2(2\cos\beta\tau - 1)\sin\beta\tau / \tau.$$

Она была выбрана из перечня корреляционных функций, наиболее часто используемых в инженерных приложениях [5] по следующим соображениям: функция не должна содержать множитель вида $e^{-\alpha|\tau|}$, приводящий к монотонности, и во избежание частных случаев должна включать в себя обе гармоники. Коэффициенты α и β подбирались методом наименьших квадратов (табл. 4.).

Таблица 4

Коэффициенты аппроксимирующей корреляционной функции по условным зонам

Значения коэффициентов	Зона входной горловины α			Зона нижней деки β_1		
	Датчик 1	Датчик 2	Датчик 3	Датчик 4	Датчик 5	Датчик 6
α	$3,487 \cdot 10^3$	$4,487 \cdot 10^3$	$7,55 \cdot 10^3$	$7,15 \cdot 10^3$	$3,25 \cdot 10^3$	$4,41 \cdot 10^3$
β	0,569	0,692	0,178	0,213	0,655	0,250
Значения коэффициентов	Зона решета γ			Зона верхней деки β_2		
	Датчик 7	Датчик 8	Датчик 9	Датчик 10	Датчик 11	Датчик 12
α	$4,205 \cdot 10^3$	$4,787 \cdot 10^3$	$2,901 \cdot 10^3$	$2,815 \cdot 10^3$	$3,676 \cdot 10^4$	$3,55 \cdot 10^3$
β	1,866	3,301	0,999	1,780	1,327	1,472

Подставляя значения коэффициентов α и β в аналитическое выражение корреляционной функции, можно получить локальные математические модели эргодических стационарных случайных процессов в каждой условной зоне:

$k_x(\tau) = 2(4,487 \cdot 10^3)^2 (2\cos 0,692\tau - 1) \sin 0,692\tau / \tau$ (зона входной горловины);

$k_x(\tau) = 2(3,25 \cdot 10^3)^2 (2\cos 0,655\tau - 1) \sin 0,655\tau / \tau$ (зона нижней деки);

$k_x(\tau) = 2(4,787 \cdot 10^3)^2 (2\cos 3,301\tau - 1) \sin 3,301\tau / \tau$ (зона решета);

$k_x(\tau) = 2(3,676 \cdot 10^4)^2 (2\cos 1,327\tau - 1) \sin 1,327\tau / \tau$ (зона верхней деки).

Выбор аналитической корреляционной функции определил вид соответствующей ей спектральной плотности [4]:

$$k_x(\tau) = 2a^2(2\cos\beta\tau - 1)\sin\beta\tau / \tau \leftrightarrow S_x^*(\omega) = \begin{cases} 0, & \text{при } 0 \leq |\omega| \leq \beta; \\ \alpha^2, & \text{при } \beta < |\omega| < 2\beta; \\ 0, & \text{при } 2\beta < |\omega|. \end{cases}$$

Используя найденные спектральные плотности (табл. 5), можно получить конкретные числовые выражения передаточных функций для каждой из динамических систем (окрестностей границ между условными зонами). Ошибку функционирования каждой системы, которая вполне может являться показателем верификации математической модели границы, определим следующим образом: $\varepsilon_x(\omega) = 1 - G(i\omega)$.

Коэффициенты спектральных плотностей
случайных процессов в условных зонах

Датчик, фиксирующий воздействие ВПС		Выражение для спектральной плотности	Интервал изменения аргумента ω
Зона входной горловины	1	$S_x^{*1}(\omega) = (3,487 \cdot 10^3)^2$	$0,569 < \omega \leq 1,138$
	2	$S_x^{*2}(\omega) = (4,487 \cdot 10^3)^2$	$0,692 < \omega \leq 1,384$
	3	$S_x^{*3}(\omega) = (7,55 \cdot 10^3)^2$	$0,178 < \omega \leq 0,356$
Зона нижней деки	4	$S_x^{*4}(\omega) = (7,15 \cdot 10^3)^2$	$0,213 < \omega \leq 0,426$
	5	$S_x^{*5}(\omega) = (3,25 \cdot 10^3)^2$	$0,655 < \omega \leq 1,31$
	6	$S_x^{*6}(\omega) = (4,41 \cdot 10^3)^2$	$0,250 < \omega \leq 0,5$
Зона решета	7	$S_x^{*7}(\omega) = (4,205 \cdot 10^3)^2$	$1,866 < \omega \leq 3,73$
	8	$S_x^{*8}(\omega) = (4,787 \cdot 10^3)^2$	$3,301 < \omega \leq 6,602$
	9	$S_x^{*9}(\omega) = (2,901 \cdot 10^3)^2$	$0,999 < \omega \leq 1,998$
Зона верхней деки	10	$S_x^{*10}(\omega) = (2,815 \cdot 10^3)^2$	$1,780 < \omega \leq 3,56$
	11	$S_x^{*11}(\omega) = (3,676 \cdot 10^4)^2$	$1,327 < \omega \leq 2,654$
	12	$S_x^{*12}(\omega) = (3,55 \cdot 10^3)^2$	$1,472 < \omega \leq 2,944$

Найденные ошибки функционирования динамических систем не выходят за пределы 5 %, что говорит о достаточно хорошей адекватности построенных моделей реальному процессу измельчения зернового сырья молотковой дробилкой закрытого типа.

Случайные стационарные процессы в условных зонах имеют постоянную спектральную плотность в определенных диапазонах частот (табл. 6), т.е. близки к так называемому «белому шуму». Близость спектральных плотностей в условных зонах к стационарному «белому шуму» (абсолютно случайному процессу) открывает широкие перспективы в поисках методов управления ВПС внутри рабочей камеры и разработке схем «регуляторов» однородности потока зернового материала.

Для подтверждения 95 % адекватности прогнозирования фракционных характеристик измельченного материала по значениям изучаемого параметра рассчитаем стандартную ошибку параметра $\varepsilon_x(\omega)$ (ошибки функционирования динамических систем):

– зона входной горловины $\alpha \leftrightarrow$ зона нижней деки β_1 :

$$\varepsilon_x(\omega) = 1 - \frac{7,15}{7,55} \approx 0,053, \quad m(\varepsilon_x) = \sqrt{\frac{1 - \varepsilon^2}{n - 2}} = \sqrt{\frac{1 - 53^2 \cdot 10^{-6}}{1000 - 2}} \approx 0,032;$$

– зона нижней деки $\beta_1 \leftrightarrow$ зона решета γ :

$$\varepsilon_x(\omega) = 1 - \frac{4,205}{4,41} \approx 0,046, \quad m(\varepsilon_x) = \sqrt{\frac{1 - \varepsilon^2}{n - 2}} = \sqrt{\frac{1 - 46^2 \cdot 10^{-6}}{1000 - 2}} \approx 0,032;$$

– зона решета $\gamma \leftrightarrow$ зона верхней деки β_2 :

$$\varepsilon_x(\omega) = 1 - \frac{2,815}{2,901} \approx 0,0296, \quad m(\varepsilon_x) = \sqrt{\frac{1-\varepsilon^2}{n-2}} = \sqrt{\frac{1-29,6^2 \cdot 10^{-6}}{1000-2}} \approx 0,0316;$$

– зона верхней деки $\beta_2 \leftrightarrow$ зона входной горловины α :

$$\varepsilon_x(\omega) = 1 - \frac{3,487}{3,55} \approx 0,018, \quad m(\varepsilon_x) = \sqrt{\frac{1-\varepsilon^2}{n-2}} = \sqrt{\frac{1-18^2 \cdot 10^{-6}}{1000-2}} \approx 0,0316.$$

Вычисленные значения свидетельствуют о том, что не более 3, 2 % выборок из массива экспериментальных данных дадут отклонение от расчетной ошибки функционирования систем случайных процессов.

Таблица 6

Передаточные функции и ошибки функционирования систем случайных процессов в условных зонах

Зона входной горловины $\alpha \leftrightarrow$ зона нижней деки β_1 : $G(i\omega)_{1 \rightarrow 2} = \sqrt{\frac{\tilde{s}_x^{*4}(\omega)}{\tilde{s}_x^{*3}(\omega)}} = 7,15/7,55, \quad \varepsilon_x(\omega) = 1 - \frac{7,15}{7,55} \approx 0,053$
Зона нижней деки $\beta_1 \leftrightarrow$ зона решета γ : $G(i\omega)_{1 \rightarrow 2} = \sqrt{\frac{\tilde{s}_x^{*7}(\omega)}{\tilde{s}_x^{*6}(\omega)}} = 4,205/4,41, \quad \varepsilon_x(\omega) = 1 - \frac{4,205}{4,41} \approx 0,046$
Зона решета $\gamma \leftrightarrow$ зона верхней деки β_2 : $G(i\omega)_{1 \rightarrow 2} = \sqrt{\frac{\tilde{s}_x^{*10}(\omega)}{\tilde{s}_x^{*9}(\omega)}} = 2,815/2,901, \quad \varepsilon_x(\omega) = 1 - \frac{2,815}{2,901} \approx 0,0296$
Зона верхней деки $\beta_2 \leftrightarrow$ зона входной горловины α : $G(i\omega)_{1 \rightarrow 2} = \sqrt{\frac{\tilde{s}_x^{*1}(\omega)}{\tilde{s}_x^{*12}(\omega)}} = 3,487/3,55, \quad \varepsilon_x(\omega) = 1 - \frac{3,487}{3,55} \approx 0,018$

Изменение потока подачи зернового сырья и величины загрузки рабочей камеры

Во всех молотковых дробилках важнейшую роль играет воздушный поток, который вместе с продуктами измельчения и образует ВПС. Анализ теоретических и экспериментальных исследований поведения и характеристик ВПС, в разное время проведенных многими учеными [1–3], позволил установить зависимость характеристик однородности ВПС от величины и способов загрузки рабочей камеры молотковой дробилки.

В специальной серии производственных экспериментов изучалось влияние величины загрузки рабочей камеры и способа подачи зернового материала на однородность ВПС. В результате построена авторская классификация способов организации технологического процесса измельчения по их влия-

нию на характеристики ВПС (для универсальных молотковых дробилок закрытого типа) (табл. 7).

Таблица 7

Авторская классификация способов организации
технологического процесса измельчения

Способ организации технологического процесса		Характер влияния на однородность ВПС	
Положение вала	Вертикальное с горизонтальным валом	Не оказывает влияния на характеристики ВПС	
	Горизонтальное с вертикальным валом		
Способ подачи продукта	Самотеком	Радиальная подача	Способствует выравниванию характеристик ВПС
		Тангенциальная подача	Увеличивает неравномерность ВПС
	Принудительно	Центральная подача	Увеличивает неравномерность ВПС
		Боковая подача	Увеличивает неравномерность ВПС
Способ отвода продукта	Самотеком	Способствует выравниванию характеристик ВПС	
	Принудительно	Воздушным потоком барабана	Способствует выравниванию характеристик ВПС
		Воздушным потоком дополнительного вентилятора	Увеличивает неравномерность характеристик ВПС
		Транспортируется шнеком	Способствует выравниванию характеристик ВПС
	С незамкнутым воздушным потоком	Без циркуляции материала	Увеличивает неравномерность характеристик ВПС
	С замкнутым воздушным потоком	С циркуляцией материала	Способствует выравниванию характеристик ВПС

Сравнительный анализ осциллограмм от датчиков показал, что даже незначительное уменьшение величины подачи зернового материала, а следовательно, и загрузки рабочей камеры (до 75 % от оптимальной) приводит к снижению разброса значений величины ударного импульса.

Если же величина потока зернового материала соответствовала загрузке камеры на 25 % от оптимальной, осциллограммы показывали хорошую выравненность характеристик ВПС на микроуровне, что, в свою очередь, от-

ражалось на однородности выходного продукта. Однако существенное снижение величины загрузки рабочей камеры в производственных условиях нежелательно, так как это отрицательно сказывается на эффективности работы измельчителя в целом [2].

Таким образом, целесообразность регулирования этого технологического параметра для отыскания его оптимального значения после производственных экспериментов доказана. Появилась перспектива улучшения гранулометрического состава измельченного продукта без значительного снижения производительности дробилки и существенных материальных затрат на конструктивные изменения рабочей камеры.

Определение характеристик случайного процесса и параметров моделей при изменении величины загрузки рабочей камеры

В результате проведения специальной серии производственных экспериментов были получены дискретные значения величины ударного импульса при изменении загрузки рабочей камеры (75 %, 50 %, 25 % от оптимальной). Характеристики случайных процессов в условных зонах и коэффициенты математических моделей при уменьшении величины загрузки рабочей камеры были найдены по авторской методике, примененной для условий полной загрузки рабочей камеры измельчителя (табл. 8, 9).

Таблица 8

Характеристики случайных процессов в условных зонах при изменении величины загрузки рабочей камеры

Характеристики	Зона входной горловины α (датчик 3)			
	100 %	75 %	50 %	25 %
m_x^i	$8,845 \cdot 10^3$	$8,387 \cdot 10^3$	$9,423 \cdot 10^3$	$9,153 \cdot 10^3$
σ_x^i	$4,246 \cdot 10^3$	$1,509 \cdot 10^3$	$0,975 \cdot 10^3$	$1,034 \cdot 10^3$
Характеристики	Зона нижней деки β_1 (датчик 4)			
	100 %	75 %	50 %	25 %
m_x^i	$1,04 \cdot 10^4$	$9,302 \cdot 10^3$	$8,363 \cdot 10^3$	$8,586 \cdot 10^3$
σ_x^i	$4,16 \cdot 10^3$	$0,394 \cdot 10^3$	$0,253 \cdot 10^3$	$0,29 \cdot 10^3$
Характеристики	Зона решета γ (датчик 9)			
	100 %	75 %	50 %	25 %
m_x^i	$8,789 \cdot 10^3$	$8,998 \cdot 10^3$	$9,237 \cdot 10^3$	$9,509 \cdot 10^3$
σ_x^i	$4,919 \cdot 10^3$	$0,406 \cdot 10^3$	$0,099 \cdot 10^3$	$0,313 \cdot 10^3$
Характеристики	Зона верхней деки β_2 (датчик 10)			
	100 %	75 %	50 %	25 %
m_x^i	$1,026 \cdot 10^4$	$8,767 \cdot 10^3$	$9,357 \cdot 10^3$	$8,834 \cdot 10^3$
σ_x^i	$4,727 \cdot 10^3$	$0,968 \cdot 10^3$	$2,401 \cdot 10^3$	$0,287 \cdot 10^3$

Действительно, при снижении величины загрузки рабочей камеры до 75 % от оптимальной эмпирическая оценка среднего квадратического отклонения σ_x^i ($i = 3, 4, 9, 10$) показывает значительное уменьшение разброса зна-

чений величины ударного импульса. Характеристики ВПС по всему периметру рабочей камеры «выравниваются», границы между условными зонами «стираются».

Таблица 9

Коэффициенты математических моделей процессов в условных зонах при изменении величины загрузки рабочей камеры

Коэффициенты	Зона входной горловины α (датчик 3)			
	100 %	75 %	50 %	25 %
α	$7,55 \cdot 10^3$	$3,887 \cdot 10^3$	$1,587 \cdot 10^3$	$3,75 \cdot 10^3$
β	0,178	0,066	0,18	0,039
Коэффициенты	Зона нижней деки β_1 (датчик 4)			
	100 %	75 %	50 %	25 %
α	$7,15 \cdot 10^3$	357	647	320
β	0,213	0,392	0,08	0,855
Коэффициенты	Зона решета γ (датчик 9)			
	100 %	75 %	50 %	25 %
α	$2,901 \cdot 10^3$	$1,02 \cdot 10^3$	140	858
β	0,999	0,069	0,18	0,06
Коэффициенты	Зона верхней деки β_2 (датчик 10)			
	100 %	75 %	50 %	25 %
α	$2,815 \cdot 10^3$	857	$1,648 \cdot 10^3$	785
β	1,78	0,779	1,66	0,065

Достоверный вывод об адекватности математической модели реальному процессу измельчения зернового сырья при уменьшении величины загрузки рабочей камеры дает ошибка функционирования динамических систем (табл. 10).

Таблица 10

Ошибки функционирования динамических систем случайных процессов в условных зонах (на примере двух границ)

Зона входной горловины $\alpha \leftrightarrow$ зона нижней деки β_1	
Загрузка 75 %	$\varepsilon_x(\omega) = 1 - \frac{357}{3887} \approx 0,91$
Загрузка 50 %	$\varepsilon_x(\omega) = 1 - \frac{647}{1587} \approx 0,59$
Загрузка 25 %	$\varepsilon_x(\omega) = 1 - \frac{320}{3750} \approx 0,91$
Зона решета $\gamma \leftrightarrow$ зона верхней деки β_2	
Загрузка 75 %	$\varepsilon_x(\omega) = 1 - \frac{857}{1020} \approx 0,16$
Загрузка 50 %	$\varepsilon_x(\omega) = 1 - \frac{1648}{140} \approx -10,77$
Загрузка 25 %	$\varepsilon_x(\omega) = 1 - \frac{785}{858} \approx 0,09$

Анализ значений ошибки функционирования динамических систем при уменьшении величины загрузки рабочей камеры показывает необходимость замены вида корреляционной функции для аппроксимации опытных данных, следовательно, использование другой спектральной плотности.

Стационарный процесс внутри рабочей камеры утрачивает характер «белого шума», что позволяет использовать изменение величины подачи зернового сырья через впускную горловину или величины загрузки рабочей камеры (величины коррелированны) для улучшения однородности ВПС.

Заключение

Анализ результатов лабораторных и производственных экспериментов позволил достоверно установить, что величина ударного импульса каждого вида измельчаемых частиц является параметром, обладающим свойствами универсальности, точности, четкости, информативности и однозначно характеризующим гранулометрический состав ВПС.

Авторские методики, примененные в процессе исследования, предоставили возможность оценить «массовый» состав измельчаемого материала в рабочей камере измельчителя в реальном времени и в любом сечении ВПС.

Используя ранее введенные теоретические положения, удалось получить конкретные числовые выражения передаточных функций для каждой из динамических систем, вычислить ошибки их функционирования и тем самым верифицировать рабочую математическую модель.

Установленные закономерности изменения параметров математической модели выводят на методы управления ВПС с целью улучшения однородности потока измельчаемого материала.

Проведенные исследования показали, что величина загрузки рабочей камеры является одним из наиболее значимых и доступных для регулирования факторов управления ВПС, который может быть использован для улучшения энергетических и технологических показателей процесса измельчения зернового сырья.

Библиографический список

1. Мельников, С. В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм / С. В. Мельников. – Л. : Колос, 1978. – 560 с.
2. Кукта, Г. М. Машины и оборудование для приготовления кормов / Г. М. Кукта. – М. : Агропромиздат, 1987. – 303 с.
3. Бурлуцкий, Е. М. Пути усовершенствования процесса дробления зернового материала и их анализ инженерно-математическими методами / Е. М. Бурлуцкий, В. Д. Павлидис, М. В. Чкалова // Агропанорама. – 2015. – № 5 (111). – С. 17–21.
4. Вентцель, Е. С. Исследование операций / Е. С. Вентцель. – М. : Высш. шк., 2000.
5. Вентцель, Е. С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М. : Академия, 2003. – 432 с.
6. Пугачев, В. С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления / В. С. Пугачев. – М. : Гостехиздат, 1957. – 659 с.
7. Пат. 2232641 Российская Федерация. Центробежно-ударная мельница / Филатов М. И., Хлынин П. П., Чкалова М. В. – Заявл. 29.07.2002; опубл. 20.07.2004, Бюл. № 20.

8. Пат. 2232638 Российская Федерация. Центробежно-ударная мельница / Филатов М. И., Хлынин П. П., Чкалова М. В. – Заявл. 29.07.2002; опубл. 20.07.2004, Бюл. № 20.
9. Пат. 2568754 Российская Федерация. Дробилка зерна / Бурлуцкий Е. М., Павлидис В. Д., Чкалова М. В. – Заявл. 04.12.2013; опубл. 10.06.2015, Бюл. № 16.

Чкалова Марина Викторовна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра информатики и прикладной
математики,
Институт управления рисками
и комплексной безопасности,
Оренбургский государственный
аграрный университет
E-mail: chkalovamv@mail.ru

Chkalova Marina Viktorovna

candidate of technical sciences,
associate professor,
sub-department of informatics
and applied mathematics,
Institute for Risk Management
and Integrated Security,
Orenburg State Agrarian University

Павлидис Виктория Дмитриевна

кандидат физико-математических наук,
профессор, кафедра информатики
и прикладной математики,
Институт управления рисками
и комплексной безопасности,
Оренбургский государственный
аграрный университет
E-mail: pavlidis@mail.ru

Pavlidis Victoria Dmitryevna

candidate of physical and mathematical
sciences, professor,
sub-department of informatics
and applied mathematics,
Institute for Risk Management
and Integrated Security,
Orenburg State Agrarian University

Капустина Оксана Александровна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра автоматизированных систем
обработки информации и управления,
Институт управления рисками
и комплексной безопасности,
Оренбургский государственный
аграрный университет
E-mail: onica1@yandex.ru

Kapustina Oksana Alexandrovna

candidate of technical sciences,
associate professor,
sub-department of automated information
processing and management systems,
Institute for Risk Management
and Integrated Security,
Orenburg State Agrarian University

УДК 51-74

Чкалова, М. В.

Определение параметров и характеристик математической модели процесса измельчения зернового сырья / М. В. Чкалова, В. Д. Павлидис, О. А. Капустина // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2017. – № 4 (24). – С. 188–202.