

ФАКТОРЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ РОТАЦИОННОГО СМЕШЕНИЯ ЗЕРНИСТОГО СЫРЬЯ ДЛЯ КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

А. Б. Капранова¹, Д. В. Стенько¹, Д. Д. Бахаева²,
А. А. Ватагин³, А. Е. Лебедев³

Кафедры: «Теоретическая и прикладная механика» (1), kapranova_anna@mail.ru, «Информационные системы и технологии» (2), «Технологические машины и оборудование» (3), ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Ярославль, Россия

Ключевые слова: вторичное сырье; зернистые материалы; модель; параметры; переработка; процесс; смешение; упругие прямоугольные лопатки.

Аннотация: Предложен способ оценки эффективности ротационного смешения указанного типа сыпучих материалов по степени близости диапазонов изменения экстремальных значений углов, характеризующих получаемые потоки частиц компонентов. К основным конструктивным особенностям ротационного смешения относятся угловые смещения двух рядов однонаправленных упругих прямоугольных лопаток, расположенных по касательной к цилиндрической поверхности смесительного барабана. Моделирование законов распределения зернистых материалов выполнено с помощью энергетического метода с учетом параметров ротационного смешения в целях подготовки соответствующей киберфизической платформы.

Введение

Негативным следствием ускоренных темпов развития химической промышленности, энергетических комплексов и объектов строительной индустрии является возрастание общих объемов отходов. Необходимость переработки значительных потоков вторичного сырья [1], в том числе техногенного характера, приводит к проблеме поиска новых форм и способов достижения показателей энерго- и ресурсоэффективности. Один из видов вторичного промышленного сырья – зернистые материалы, дальнейшее применение которых или их утилизация зачастую связаны с предварительным качественным смешением. Достижение показателей однородности получаемой зернистой смеси в данной случае рассматривается как приоритетное [2, 3]. Привлечение принципов работы киберфизических систем позволяет успешно справляться с такого рода задачами [4]. При этом подготовительный этап формирования киберфизической платформы требует установления достаточно полных наборов параметров, определяющих информационные переменные проектируемого конструктивного решения для технологического процесса смешения техногенного сырья. Например, в состав подобных смесей строительного назначения может входить шлаковый песок как продукт сжигания на теплоэлектростанциях (ТЭС) топлива из твердых материалов [5]. Однако отсутствие стабильности характерных механических свойств данных продуктов переработки приводит к дополнительным сложностям получения соответствующих

качественных зернистых смесей, свободных от эффекта сегрегации при заданном регламентном гранулометрическом составе [1, 6].

Организация непрерывного режима смешения зернистых материалов в разреженных потоках требует выполнения ряда условий на технические характеристики аппарата, в которые входят, например, следующие наборы [4, 7, 8]:

- а) параметров конструкции (геометрические размеры основных смесительных элементов, рабочей камеры);
- б) режимных показателей (частота вращения барабана, высота слоев компонентов и зазор между барабаном и опорной плоскостью для указанных слоев);
- в) характеристик свойств смешиваемых компонентов и материалов конструкции (механические, физические).

Заметим, что эффективность применения смесительных элементов в виде упругих лопаток [9] или щеток [3, 4, 10] различных форм и способов закрепления на вращающемся барабане (внешним [3, 4, 10] или внутренним [11] образом) существенно зависит от их конструктивных параметров, системы дозирования.

Цель работы – оценка эффективности ротационного смешения зернистых материалов по степени близости диапазонов изменения экстремальных значений углов, характеризующих получаемые потоки частиц компонентов, на основе соответствующей стохастической модели. При этом использованы основные принципы системно-структурного анализа изучаемого процесса [12] и энергетический метод моделирования Ю. Л. Климонтовича [13] для указанного процесса ротационного смешения зернистого сырья на этапе подготовки соответствующей киберфизической платформы.

Применение комплекса режимно-конструктивных параметров процесса при моделировании ротационного смешения

На этапе формирования киберфизической платформы особую роль играют информационные параметры [7, 9] исследуемого процесса получения сыпучей смеси, в том числе из промышленных отходов. Кратко остановимся на вопросе некоторых конструктивных особенностей процесса ротационного смешения зернистого сырья, например, реализуемого в аппарате с подвижной лентой [14] или в рабочей камере с цилиндрическим корпусом [15] для указанного смесительного узла. В частности, для образования потоков сыпучих компонентов в разреженном состоянии используются смесительные барабаны с упругими лопатками. Такие прямоугольные лопатки закреплены в два ряда в одном направлении по касательной к внешней цилиндрической поверхности данного барабана с равными угловыми интервалами. Описанные ряды лопаток имеют их одинаковое число, при этом наблюдаются угловые смещения рядов по отношению друг к другу в плоскости поперечного сечения к оси барабана.

Для дальнейшего моделирования обозначим весь набор конструктивных параметров основного смесительного узла аппарата в виде следующего множества:

$$Z(t) \equiv \{A, B, X(t), Y(t)\}, \quad (1)$$

где $A \equiv \{A_{k_1} = \text{const}\}$ – параметры для смесительного узла конструкции, $k_1 = \overline{1, s_1}$; $B \equiv \{B_{k_2} = \text{const}\}$ – параметры для заданного режима непрерывного процесса переработки зернистого сырья, $k_2 = \overline{1, s_2}$; $X(t) \equiv \{X_1, X_2\} = \{X_i\}$ – входные параметры для компонента, $i = \overline{1, 2}$; $Y(t) \equiv \{V_C, X_i\}$ – выходные параметры при требуемом значении коэффициента неоднородности готового продукта V_C .

Полные множества составляющих набора Z из выражения (1) имеют вид:

$$A = \{R_b, L_b, R_C, l_b, q_b, h_b, K_s, K_r, \varepsilon\}; \quad (2)$$

$$B = \{H_0, H_{Li}, \omega\}; \quad (3)$$

$$X = \{C_{Vi}, Q_{Vi}\}; \quad (4)$$

$$Y = \{V_C^{\text{reg}}, \Delta V_C, C_{Vi}, Q_{Vi}\}, \quad (5)$$

где R_b, L_b – радиус и длина смесительного барабана соответственно; R_C – характерный размер рабочей камеры (например, ширина подвижной ленты или радиус цилиндрического корпуса для смесительного барабана); l_b, q_b, h_b – длина, ширина и высота лопатки прямоугольной формы соответственно; K_s, K_r – число упругих лопаток каждого ряда и число рядов (пусть $K_r = 2$); ε – угловые смещения для K_r рядов по отношению друг к другу в плоскости поперечного сечения к оси барабана; H_0 – высота зазора между барабаном и опорной поверхностью для слоев зернистого сырья; H_{Li} – полная высота i -го слоя на входе в указанный зазор; ω – угловая скорость вращения смесительного элемента (барабана); C_{Vi} – объемные доли смешиваемых сыпучих компонентов; Q_{Vi} – значение объемного расхода i -го зернистого материала; V_C^{reg} – регламент для оценки качества смеси по критерию в виде коэффициента неоднородности V_C ; ΔV_C – заданная абсолютная погрешность для значения V_C^{reg} .

Следовательно, с учетом того, что получаемая смесь является двухкомпонентной ($i = \overline{1,2}$), общее число информационных переменных $K_z = 19$. Кроме того, особое место в числе факторов, влияющих на характер смешивания зернистых компонентов, занимают их физико-механические характеристики, например, входящие в множество $Q = \{D_i, \rho_i\}$, здесь D_i – диаметры частиц смешиваемого зернистого сырья, $i = \overline{1,2}$; ρ_i – плотности соответствующих веществ.

Заметим, что при проектировании смесительного аппарата ротационного типа формирование оптимизационной задачи по нахождению соответствующих оптимальных значений параметров носит многофакторный характер. Однако при решении практических задач часто бывает достаточно выявить рациональные интервалы изменения параметров класса Z из выражения (1) на основе математического моделирования исследуемого процесса с учетом наиболее значимых его факторов, которые также требуется установить.

Основой проектирования ротационного аппарата для смешения зернистого сырья служит моделирование образования потоков компонентов в разреженном состоянии с позиций стохастического подхода [16, 17]: методов кибернетического характера [18], использование временных рядов [19], понятия информационной энтропии [20] и цепей Маркова при ряде модификаций [21, 22]. Имеются все предпосылки для применения методологии киберфизической системы к исследованию указанного случайного процесса смешения и разработке инженерной методики расчета его параметров. Уровень управления процессом смешения зернистого сырья (в соотношении объемных долей компонентов $C_{V1} : C_{V2}$) достигается через множество информационных переменных Z благодаря обратной связи со-

гласно (1), (2). Последние проявляются, например, в форме сравнительных расчетов прогнозируемого V_C и регламентного V_C^{reg} значений коэффициента неоднородности готовой смеси. Целесообразность применения вероятностного описания картины распределения частиц сыпучих материалов в образующихся потоках вытекает из случайного характера указанного процесса смешения. Предпочтение отдается энергетическому методу Ю. Л. Климонтовича [13], уже апробированному для решения аналогичных задач [3, 4, 9, 10].

Предпринятая попытка моделирования процесса смешения зернистых материалов для барабана с однорядным набором упругих не радиальных лопаток ($K_r = 1$) может быть расширена для случаев двухрядного ($K_r = 2$) или многорядного креплений [12]. Остановимся на втором случае, когда $K_r = 2$.

Пусть слои смешиваемых компонентов зернистого сырья ($i = \overline{1, 2}$) после их дозирования и вертикальной загрузки попадают в зазор вращающегося барабана и опорной поверхности (для подвижной ленты или соосной цилиндрической камеры). Затем частицы из указанных слоев взаимодействуют с упругими лопатками, отрываются от них и переходят в разреженное состояние, образуя однонаправленные потоки зернистых сред. С учетом случайности поведения множества частиц каждого компонента предполагается выполнение положений энергетического метода, приведенных в [13]. Пусть зернистое сырье, подлежащее переработке, имеет частицы, близкие по форме к сферическим с диаметром D_i , равным усредненному значению по фракциям. Вследствие однонаправленности движения указанных потоков ($i = \overline{1, 2}$) считается, что данные макросистемы свободны от макромасштабных флуктуаций их состояний. Поведение частиц указанных компонентов соответствует энергетически закрытым макросистемам. Тогда описание стационарного случая для решения кинетического уравнения Фоккера–Планта при однородном, стационарном случайном процессе Маркова выполняется с помощью фазовых переменных (V_{xij}, V_{yij}) или в представлении полярных координат (r_{ij}, θ_{ij}). Используя принятые выше приближения и выражая скорость центра масс частицы каждого компонента ($i = \overline{1, 2}$) в зависимости от положения конечных точек упругих лопаток при их перемещении по спирали Архимеда [9], формируется выражение для энергии стохастического движения частицы $E_{ij}(r_{ij}, \theta_{ij})$.

Указанная зависимость $E_{ij}(r_{ij}, \theta_{ij})$, согласно множеству (3), соответствует элементу фазового объема

$$d\Omega_{ij} = -\omega^2 r_{ij} dr_{ij} d\theta_{ij} \quad (6)$$

и учитывает множество параметров из выражения (1): A – для смесительного узла конструкции, $k_1 = 1, s_1$; B – для заданного режима непрерывного процесса переработки зернистого сырья, $k_2 = 1, s_2$.

В отличие от данных, приведенных в [9], уравнение спирали Архимеда

$$r_{Aij}(\theta_{ij}) = \lambda_0 + \lambda_1 \theta_{ij} \quad (7)$$

дополнительно учитывает параметр H_0 из набора (3) и наличие второго ряда лопаток ($K_r = 2$). Выражение (7) содержит коэффициенты λ_0, λ_1 , которые зависят от наборов A, B из выражений (2), (3):

$$\lambda_0 = R_b(1 - \cos \varphi_0) + H_0; \quad (8)$$

$$\lambda_1 = \frac{\left\{ [R_b(1 + \cos \varphi_0)]^2 + (R_b + l_b)^2 \right\}^{1/2} - \lambda_0 - \frac{H_0}{3}}{\varphi_\delta}; \quad (9)$$

где

$$\varphi_\delta = \pi + \operatorname{arctg} \left\{ \frac{R_b + l_b}{R_b(1 + \cos \varphi_0)} \right\}; \quad (10)$$

$$\varphi_0 = 2\pi/K_s. \quad (11)$$

Общий вид энергии стохастического движения частицы E_{ij} при $i = \overline{1,2}$ с учетом (7) и угловой жесткости лопаток k_u задается выражением

$$E_{ij}(\theta_{ij}) = a_i D_i \omega^2 [10s_{30} w_{ij}(\theta_{ij}) + D_i^2] w_{ij}(\theta_{ij}) + k_u \theta_{ij}^2 / 2, \quad (12)$$

где с учетом (8) – (11) обозначено:

$$w_{ij}(\theta_{ij}) \equiv \frac{(\mu_0 + \mu_1 \theta_{ij})^4}{\mu_0^2 [s_0 + s_1 \theta_{ij}]^2 + s_{20}^2}; \quad (13)$$

$$a_i \equiv \frac{\pi \rho_i}{12}; \quad s_0 \equiv \cos \left\{ \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{\lambda_1}{\lambda_0} \right\}; \quad (14)$$

$$s_1 \equiv \frac{\lambda_1^2}{2n_4} \sin \left\{ \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{\lambda_1}{\lambda_0} \right\}; \quad (15)$$

$$s_{20} \equiv [s_0(1 - s_0)]^{1/2}; \quad s_{30} \equiv (s_0^2 + s_{20}^2)^{1/2}; \quad (16)$$

$$\mu_1 \equiv \frac{\frac{3n_2}{2\lambda_0^3} + n_0 n_4 \frac{\lambda_1}{\lambda_0} + \lambda_0^3 \lambda_1 \frac{2n_4(n_0^2 - \lambda_0^2) + n_3}{8n_1}}{n_4}; \quad (17)$$

$$n_0 \equiv \lambda_0 \cos \left\{ \frac{3}{2} \operatorname{arctg} \frac{\lambda_1}{\lambda_0} \right\}; \quad n_1 \equiv \frac{\lambda_0 - n_0^2 + R_b^2}{2}; \quad n_2 \equiv \lambda_1^2 \sin \left\{ \frac{3}{2} \operatorname{arctg} \frac{\lambda_1}{\lambda_0} \right\}; \quad (18)$$

$$n_3 \equiv \frac{3}{2} \lambda_0 \lambda_1 \sin \left\{ 3 \operatorname{arctg} \frac{\lambda_1}{\lambda_0} \right\}; \quad n_4 \equiv \lambda_0^2 + \lambda_1^2. \quad (19)$$

Дифференциальные функции распределения $p_{ij}(\theta_{ij})$ для числа частиц N_{ij} в потоках зернистых компонентов после работы смесительного узла «барабан – упругие лопатки» получены в зависимости от угла рассеивания θ_{ij} :

$$p_{ij}(\theta_{ij}) = \frac{1}{N_{ij}} \frac{dN_{ij}}{d\theta_{ij}}; \quad (20)$$

$$P_i(\theta_{ij}) = \prod_{j=1}^{K_r} p_i(\theta_{ij}), \quad (21)$$

где полные функции распределения $P_i(\theta_{ij})$ определяются независимыми случайными процессами взаимодействия частиц смешиваемых компонентов с упругими лопатками разных рядов, расположенных с угловыми смещениями ε . При нахождении $p_{ij}(\theta_{ij})$ и $P_i(\theta_{ij})$ в соответствии с выражениями (20), (21) использован следующий вид стационарного решения кинетического уравнения Фоккера–Планка [13]:

$$f_{ij} = \alpha_{ij} \exp\left(\frac{E_{ij}}{E_{0ij}}\right), \quad (22)$$

где параметры α_{ij} и E_{0ij} определяются соответственно нормировочными операциями и балансом энергий на этапах захвата зернистых частиц лопатками в зазоре барабана и их рассеивания в потоках. Полученные согласно (12) – (19) аналитические выражения для функций $p_{ij}(\theta_{ij})$ и $P_i(\theta_{ij})$ не приводятся вследствие их громоздкости. Результаты моделирования в дальнейшем могут быть использованы для анализа условий достижения регламентной производительности процесса смешения зернистого сырья, в том числе с учетом дополнительного этапа ударного смешивания [23, 24].

Результаты моделирования

Результаты работы смесительного узла с двумя рядами лопаток иллюстрируются на примере получения предварительного состава для строительной смеси из зернистого сырья с двумя компонентами (рис. 1–3): песка шлакового ГОСТ 5578–2019 ($i = 1$; $\rho_1 = 1,30 \cdot 10^3$ кг/м³; $D_1 = 2,25 \cdot 10^{-4}$ м) и природного песка

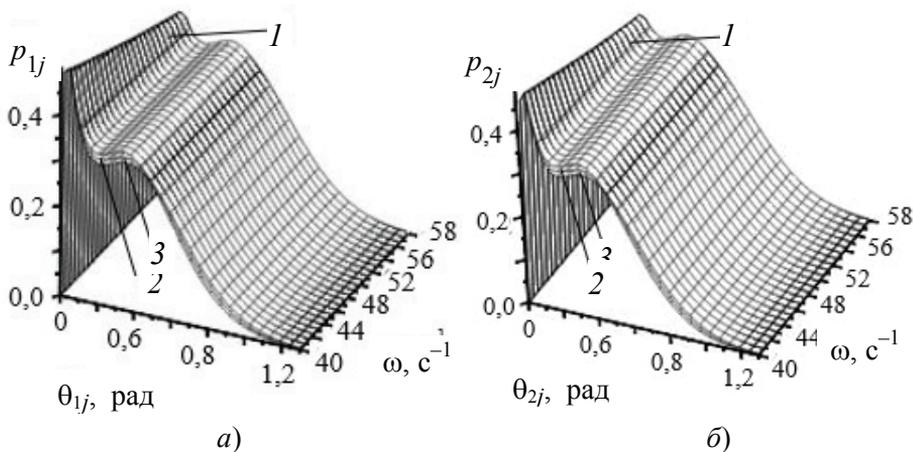


Рис. 1. Зависимость $p_{ij}(\theta_{ij}, \omega)$:

а – песок шлаковый ГОСТ 5578–2019 ($i = 1$); б – песок природный ГОСТ 8736–2014 ($i = 2$); $K_s = 8$; $K_r = 2$; $\delta = 0,67$; $1 - \varepsilon = 0$; $2 - \varepsilon = 0,3927$ рад; $3 - \varepsilon = 0,5236$ рад

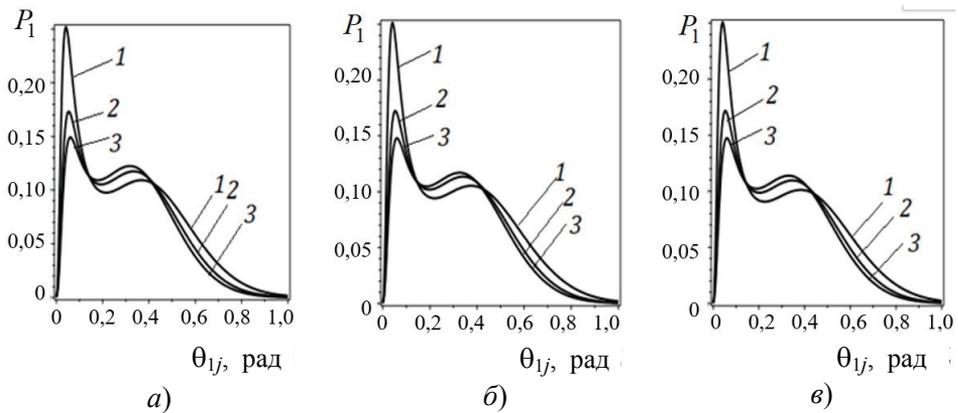


Рис. 2. Зависимость $P_1(\theta_{1j}, \omega)$ для песка шлакового ГОСТ 5578–2019 ($i = 1$):

$$K_s = 8; K_r = 2; \omega = 57,6 \text{ с}^{-1}; a - \varepsilon = 0; \delta - \varepsilon = 0,3927 \text{ рад}; \varepsilon - \varepsilon = 0,5236 \text{ рад}; \\ 1 - \delta = 0,60; 2 - \delta = 0,67; 3 - \delta = 0,70$$

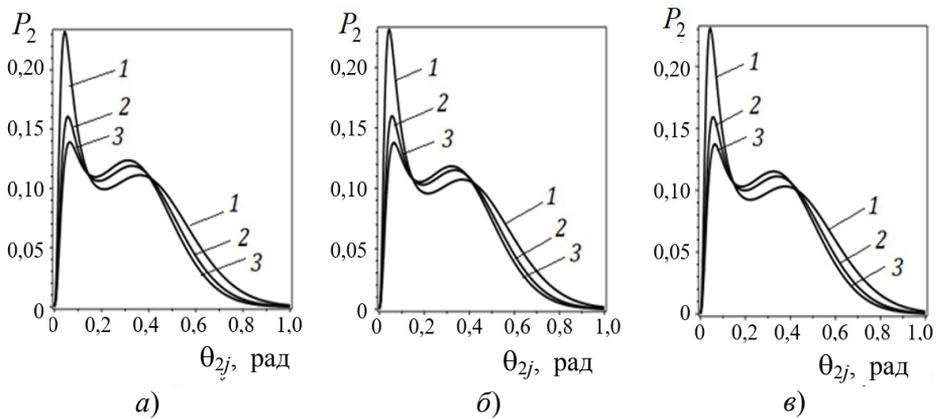


Рис. 3. Зависимость $P_2(\theta_{2j}, \omega)$ для песка природного ГОСТ 8736–2014 ($i = 2$):

$$K_r = 2; \omega = 57,6 \text{ с}^{-1}; a - \varepsilon = 0; \delta - \varepsilon = 0,3927 \text{ рад}; \varepsilon - \varepsilon = 0,5236 \text{ рад}; \\ 1 - \delta = 0,60; 2 - \delta = 0,67; 3 - \delta = 0,70$$

ГОСТ 8736–2014 при $i = 2$; $\rho_2 = 1,80 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; $D_2 = 2,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}$. Пусть $\omega = 41,0 \dots 53,0 \text{ с}^{-1}$; $R_b = 3,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; $l_b = 4,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; $K_s = 8$; $K_r = 2$; $H_0 = 3,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; $H_L = H_{L1} + H_{L2} = 3,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$. Данные о полученных значениях энергетического параметра E_{0ijk} при $\omega = 57,6 \text{ с}^{-1}$ приведены в табл. 1 [25, 26].

Анализ результатов позволяет выявить основные факторы, вносящие наибольший вклад в характер поведения искомых функций $p_{ij}(\theta_{ij})$ и $P_i(\theta_{ij})$ из выражений (20) и (21), в частности, параметры ротационного смесителя: режимные (угловая скорость ω , число рядов лопаток K_r ; угловое смещение лопаток ε) и комплексный конструктивный (степень деформации лопаток $\delta = r_b / l_b$).

Из графиков (см. рис. 1 – 3) очевидно, что важным следствием проведенных исследований является совпадение областей для экстремальных значений углов рассеивания частиц обоих компонентов, что может рассматриваться как выполнение условия эффективности работы проектируемого аппарата для смешивания зернистого сырья. Данный факт наблюдается как для дифференциальных функций

Таблица 1

Полученные значения энергетического параметра E_{0ijk} при $\omega = 57,6 \text{ с}^{-1}$

Характеристика, обозначение, размерность		Энергетический параметр E_{0ijk} , 10^{-4} Дж	
Угол смещения для рядов лопаток ε , рад	Степень деформирования лопатки δ	Песок шлаковый ГОСТ 5578–2019, $i = 1$	Песок природный ГОСТ 8736–2014, $i = 2$
0	0,60	1,34	1,30
	0,67	1,13	1,11
	0,70	1,04	1,03
0,3927	0,60	1,45	1,41
	0,67	1,23	1,19
	0,70	1,16	1,12
0,5236	0,60	1,58	1,54
	0,67	1,33	1,29
	0,70	1,23	1,19

распределения $p_{ij}(\theta_{ij})$ числа частиц N_i в потоках зернистых компонентов после работы смесительного узла «барабан – упругие лопатки» (например, графики 1, см. рис. 1, а, б), так и для полных функций $P_i(\theta_{ij})$, в том числе на рис. 2, б (график 2) и рис. 3, б (график 2). Применение рядов лопаток с угловым смещением позволяет ориентировать рассеянный поток частиц в более узкую область вблизи наиболее вероятного угла разбрасывания смешиваемых зернистых компонентов (в частности, графики 1 и 3, см. рис. 2, в; графики 1 и 3, см. рис. 3, в). Результаты проведенного исследования эффективности процесса ротационного смешивания являются частью соответствующего системно-структурного анализа данной технологической операции и в дальнейшем, аналогично [26], могут быть использованы для анализа условий достижения регламентной производительности процесса смешения зернистого сырья, в том числе с учетом дополнительного этапа ударного смешивания [27].

Заключение

Таким образом, процесс смешения зернистого сырья, в том числе техногенного, с помощью ротационного способа с применением двух рядов упругих прямоугольных лопаток рассмотрен с позиции подготовки киберфизической платформы. Указанные упругие элементы закреплены в одном направлении по касательной к внешней цилиндрической поверхности смесительного барабана. Формирование данной платформы соответствует выбору множества информационных переменных (1), в составе которого имеются параметры процесса: входные $X(t)$, выходные $Y(t)$, конструктивные A , режимные B . Заметим, что общее число этих параметров (информационных переменных) $K_z = 19$. Дополнительные учитываемые параметры – характеристики физических и механических свойств рабочих

веществ (смешиваемого зернистого сырья, упругих элементов). Применение стохастического моделирования позволило оценить эффективность ротационного процесса получения зернистых смесей по степени близости диапазонов изменения экстремальных значений углов, характеризующих получаемые потоки частиц компонентов. В частности, показано, что применение двух рядов лопаток с угловым смещением позволяет ориентировать рассеянный поток частиц в более узкую область вблизи наиболее вероятного угла разбрасывания смешиваемых зернистых компонентов.

Список литературы

1. Bauman, I. Mixing of Solids in Different Mixing Devices / I. Bauman, D. Curic, M. Boban // *Sadhana*. – 2008. – V. 33, No. 6. – Pp. 721 – 731. doi: 10.1007/s12046-008-0030-5
2. Исследование качества смеси на первой стадии работы аппарата гравитационного типа / А. Б. Капранова, И. И. Верлока, П. А. Яковлев, Д. Д. Бахаева // *Российский химический журнал (Журнал химического общества им. Д. И. Менделеева)*. – 2018. – Т. 62, № 4. – С. 48 – 50.
3. Капранова, А. Б. Стохастическое описание процесса формирования потоков сыпучих компонентов в аппаратах со щеточными элементами / А. Б. Капранова, И. И. Верлока // *Теор. основы хим. технологии*. – 2018. – Т. 52, № 6. – С. 707 – 721.
4. Kapranova, A. B. About Preparation of the Analytical Platform for Creation of a Cyber-Physical System of Industrial Mixture of Loose Components / A. B. Kapranova, I. I. Verloka, D. D. Bahaeva // In monograph: *Cyber-Physical Systems: Advances in Design &Modelling. Studies in Systems, Decision and Control / A. Kravets, A. Bolshakov, M. Shcherbakov (eds.)*. – V. 259. – Springer, Cham, 2020. – P. 81-91. doi: 10.1007/978-3-030-32579-4_7
5. Shaul, S. Generalized Flow Regime Diagram of Fluidized Beds Based on the Height to Bed Diameter Ratio / S. Shaul, E. Rabinovich, H. Kalman // *Powder Technology*. – 2012. – Vol. 228. – P. 264 – 271.
6. Макаров, Ю. И. Аппараты для смешения сыпучих материалов / Ю. И. Макаров. – М. : Машиностроение, 1973. – 216 с.
7. To the Calculation of the Average Value of the Volume Fraction of the Key Bulk Component at the Intermediate Stage of Mixing with an Inclined Bump / A. B. Kapranova, I. I. Verloka, D. D. Bahaeva, M. Yu. Tarshis, S. N. Cherpitsky // *Frontiers in Energy Research: Process and Energy Systems*. – 2020. – Vol. 8, article 135. – P. 1 – 11. doi:10.3389/fenrg.2020.00135
8. Modeling the Horizontal Movement of Bulk Material in the System “Conveyor – Rotary Mixer” / V. Zaslavskiy, S. Shved, M. Shepelenko, N. Suslo // *E3S Web Conf*. – 2020. – Vol. 166. – P. 06008. doi:10.1051/e3sconf/202016606008
9. A Model of Rotational Mixing of Loose Environment on the Platform of Cyber-Physical Systems / A. B. Kapranova, D. D. Bahaeva, D. V. Stenko, I. I. Verloka // In: *Kravets A.G., Bolshakov A.A., Shcherbakov M. (eds.) Cyber-Physical Systems: Design and Application for Industry 4.0. Studies in Systems, Decision and Control*. – Springer, Cham, 2021. – V. 342. – P. 167 –178. doi:10.1007/978-3-030-66081-9_13
10. Капранова, А. Б. Моделирование критерия качества смеси в объеме барабанно-ленточного устройства / А. Б. Капранова, М. Н. Бакин, И. И. Верлока // *Хим. и нефтегаз. машиностроение*. – 2018. – № 5. – С. 3 – 9.
11. Исследование процесса смешивания сыпучих материалов в барабанно-лопастном смесителе / С. Н. Черпицкий, М. Ю. Таршис, Л. В. Королев, А. Б. Капранова // *Хим. и нефтегаз. машиностроение*. – 2020. – Т. 56, № 1. – С. 3 – 6.

12. Кафаров, В. В. Системный анализ процессов химической технологии. Процессы измельчения и смешения сыпучих материалов / В. В. Кафаров, И. Н. Дорохов, С. Ю. Арутюнов. – М. : Наука, 1985. – 440 с.
13. Климонтович, Ю. Л. Турбулентное движение и структура хаоса: Новый подход к статистической теории открытых систем / Ю. Л. Климонтович. – М. : ЛЕНАНД, 2014. – 328 с.
14. Исследование энергетических характеристик процесса смешивания сыпучих компонентов в ротационном аппарате / А. Б. Капранова, Д. Д. Бахаева, Д. В. Стенько, И. И. Верлока // Вестник ИГЭУ. – 2020. – № 3. – С. 70 – 78. doi: 10.17588/2072-2672.2020.3.070-078
15. Пат. 2 749 510 Российская Федерация, МПК В01F 3/18, В01F 5/04, В01F 7/00, В01F 9/10. Смеситель сыпучих материалов / Лебедев А. Е., Капранова А. Б., Стенько Д. В. ; патентообладатель ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет». – № 2020123334 ; заявл. 07.07.2020 ; опубл. 11.06.2021, Бюл. № 17. – 8 с.
16. Баруча-Рид, А. Т. Элементы теории марковских процессов и их приложения / А. Т. Баруча-Рид. – М. : Наука, 1969. – 225 с.
17. Рёпке, Г. Неравновесная статистическая механика / Г. Рёпке ; пер. с нем. С. В. Тищенко ; под ред. Д. Н. Зубарева. – М. : Мир, 1990. – 320 с.
18. A Dimensionless Analysis of Residence Time Distributions for Continuous Powder Mixing / T. Geng, L. L. Sau, Ya. Xiaochuan, S. H. Moo // Powder Technology. – 2017. – Vol. 315. – P. 332 – 338. doi: 10.1016/j.powtec.2017.04.007
19. Кендалл, М. Многомерный статистический анализ и временные ряды : монография / М. Кендалл, А. Стьюарт. – М. : Наука, 1976. – 736 с.
20. Леончик, Б. И. Измерения в дисперсных потоках / Б. И. Леончик, В. П. Маякин. – М. : Энергия, 1971. – 248 с.
21. Gatumel Markov Chain Model of Mixing Kinetics for Ternary Mixture of Dissimilar Particulate Solids / V. Mizonov, I. Balagurov, H. Berthiaux, C. Gatumel // Particuology. – 2016. – Vol. 31. – P. 80 – 86. doi: 10.1016/j.partic.2016.05.006
22. Zhuang, Y. Stochastic Bubble Developing Model Combined with Markov Process of Particles for Bubbling Fluidized Beds / Y. Zhuang, X. Chen, D. Liu // Chemical Engineering Journal. – 2016. – Vol. 291. – P. 206 – 214. doi: 10.1016/j.cej.2016.01.095
23. Kapranova, A. Factors of Increasing the Performance of the Bulk Material Mixer of the Gravity Type / A. Kapranova, I. Verloka, D. Bahaeva // In: Anatolis B., Nikolai V., Vitalii S. (eds) Proceedings of EECE 2019. EECE 2019. Lecture Notes in Civil Engineering. – Springer, Cham, 2020. – Vol. 70. – P. 337 – 347. doi: 10.1007/978-3-030-42351-3_30
24. Stochastic Analysis of Impact Mixing of Bulk Materials in a Rotary Apparatus / A. Kapranova, D. Bahaeva, D. Stenko, D. Fedorova, A. Vatagin, A. Lebedev // E3s Web of Conference. – 2021. – V. 247. – P. 01048. Published online 05 April 2021. doi: 10.1051/e3sconf/202124701048
25. Анализ эффективности смешения зернистого сырья при подготовке киберфизической платформы / А. Б. Капранова, Д. В. Стенько, Д. Д. Бахаева, А. А. Ватагин, А. Е. Лебедев // Математические методы в технологиях и технике. – СПб., 2021. – Т. 1. – С. 110 – 115.
26. Analysis of the Efficiency of the Rotary Method for Producing a Mixture of Granular Raw Materials in the preparation of a cyber-physical platform / A. B. Kapranova, D. V. Stenko, D. D. Bahaeva, A. A. Vatagin, A. E. Lebedev // In book: Kravets A. G., Bolshakov A. A., Shcherbakov M. (eds). Cyber-Physical Systems: Modelling and Industrial Application, Studies in Systems, Decision and Control. – Springer Nature Switzerland AG 2022.–2022. –V. 418. – P. 299–310. doi:10.1007/978-3-030-95120-7_25

Efficiency Factors of Rotary Mixing of Granular Raw Materials for the Cyber-Physical Platform

A. B. Kapranova¹, D. V. Stenko¹, D. D. Bahaeva², A. A. Vatagin³, A. E. Lebedev³

*Departments of Theoretical and Applied Mechanics (1), kapranova_anna@mail.ru;
Information Systems and Technologies (2), Technological Machines and Equipment (3),
Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia*

Keywords: secondary raw materials; granular materials; model; parameters; process; processing; mixing; elastic blades.

Abstract: The preparation of a cyber-physical platform for processing secondary raw materials of a granular structure is an urgent problem. A method for evaluating the efficiency of rotary mixing of the specified type of bulk materials by the degree of proximity of the ranges of changes in the extreme values of the angles characterizing the resulting flows of component particles is proposed. The main design features of rotary mixing include: angular displacements of two rows of unidirectional elastic rectangular blades located tangentially to the cylindrical surface of the mixing drum. The simulation of the distribution laws of granular materials is carried out on the basis of the energy method, taking into account many parameters of the rotary mixing process in order to prepare the corresponding cyber-physical platform.

References

1. Bauman I., Curic, D., Boban, M. Mixing of solids in different mixing devices, *Sadhana*. 2008, vol. 33, no. 6, pp. 721-731. doi: 10.1007/s12046-008-0030-5
2. Kapranova A.B., Verloka I.I., Yakovlev P.A., Bahaeva D.D. Investigation of the Quality of the Mixture at the First Stage of Operation of a Gravitational Apparatus, *Russian Journal of General Chemistry*, 2020, no. 90(6), pp. 1178-1179. doi: 10.1134/S1070363220060341
3. Kapranova A.B., Verloka I.I. Studying the Porosity of Powders under Pressure Compaction in Deaeration Mixers, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2018, no. 52 (6), pp. 1004-1018. doi:10.1134/S0040579518050330
4. Kapranova A.B., Verloka I.I., Bahaeva D.D. About preparation of the analytical platform for creation of a cyber-physical system of industrial mixture of loose components, In: *Cyber-Physical Systems: Advances in Design & Modelling. Studies in Systems, Decision and Control*, Eds. A. Kravets, A. Bolshakov, M. Shcherbakov, vol. 259. Cham: Springer, 2020, pp. 81-91. doi: 10.1007/978-3-030-32579-4_7
5. Shaul S., Rabinovich E., Kalman H. Generalized flow regime diagram of fluidized beds based on the height to bed diameter ratio, *Powder Technology*, 2012, vol. 228, pp. 264-271.
6. Makarov Yu.I. *Apparaty dlya smesheniya sypuchikh materialov* [Devices for mixing bulk materials], Moscow: Mashinostroyeniye, 1973, 216 p. (In Russ.).
7. Kapranova A.B., Verloka I.I., Bahaeva D.D., Tarshis M.Yu., Cherpitsky S.N. To the calculation of the average value of the volume fraction of the key bulk component at the intermediate stage of mixing with an inclined bump, *Frontiers in Energy Research: Process and Energy Systems*, 2020, vol. 8, article 135, pp. 1-11. doi: 10.3389/fenrg.2020.00135
8. Zaselskiy V., Shved S., Shepelenko M., Suslo N. Modeling the horizontal movement of bulk material in the system “conveyor – rotary mixer”, *E3S Web Conf.*, 2020, vol. 166, 06008. doi: 10.1051/e3sconf/202016606008
9. Kapranova A.B., Bahaeva D.D., Stenko D.V., Verloka I.I. A Model of rotational mixing of loose environment on the platform of cyber-physical systems.

In: Kravets A.G., Bolshakov A.A., Shcherbakov M. (Eds.) *Cyber-Physical Systems: Design and Application for Industry 4.0. Studies in Systems, Decision and Control*, Cham: Springer, 2021, vol. 342, pp. 167-178. doi: 10.1007/978-3-030-66081-9_13

10. Kapranova A.B., Bakin M.N., Verloka I.I. Simulation of the Quality Criterion of a Mixture in a Drum-Belt Apparatus, *Chemical and Petroleum Engineering*, 2018, vol. 54, no. 5-6, pp. 287-297. doi: 10.1007/s10556-018-0477-0

11. Cherpitskii S.N., Tarshis M.Y., Korolev L.V., Kapranova A.B. An Investigation of the Process of Mixing of Bulk Materials in a Drum-Blade Mixer. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2020, vol. 56, no. 1, 3-10. doi: 10.1007/s10556-020-00731-w

12. Kafarov V.V., Dorokhov I.N., Arutyunov S.Yu. *Sistemnyi analiz protsessov khimicheskoi tekhnologii. Protsessy izmel'cheniya i smesheniya sypuchikh materialov* [System analysis of the processes of chemical technology. Processes of grinding and mixing of bulk materials], Moscow: Nauka, 1985, 440 p. (In Russ.).

13. Klimontovich Yu.L. *Turbulentnoye dvizheniye i struktura khaosa: Novyy podkhod k statisticheskoy teorii otkrytykh sistem* [Turbulent motion and the structure of chaos: A new approach to the statistical theory of open systems], Moscow: LENAND, 2014, 328 p. (In Russ.).

14. Kapranova A.B., Bakhaeva D.D., Stenko D.V., Verloka I.I. [Investigation of the energy characteristics of the process of mixing bulk components in a rotary apparatus], *Vestnik IGEU [Transactions of the Ivanovo State Energy University]*, 2020, no. 3, pp. 70-78. doi: 10.17588/2072-2672.2020.3.070-078 (In Russ., abstract in Eng.).

15. Lebedev A.E., Kapranova A.B., Stenko D.V. *Smesitel sypuchikh materialov* [Mixer of bulk materials], Russian Federation, 2021, Pat. 2749510. (In Russ.).

16. Barucha-Rid A.T. *Elementy teorii markovskikh protsessov i ikh prilozheniya* [Elements of the theory of Markov processes and their applications], Moscow: Nauka, 1969, 225 p. (In Russ.).

17. Röpke G. *Neravnovesnaya statisticheskaya mekhanika* [Nonequilibrium Statistical Mechanics]; translation from German by S.V. Tishchenko, ed. D.N. Zubareva. Moscow: Mir, 1990, 320 p. (In Russ.).

18. Geng T., Sau L.L., Xiaochuan Ya., Moo S.H. A dimensionless analysis of residence time distributions for continuous powder mixing, *Powder Technology*, 2017, vol. 315, pp. 332-338. doi: 10.1016/j.powtec.2017.04.007

19. Kendall M., Stuart A. *Mnogomernyy statisticheskiy analiz i vremennyye ryady: monografiya* [Multivariate statistical analysis and time series: monograph]. Moscow: Nauka, 1976, 736 p. (In Russ.).

20. Leonchik B.I., Mayakin V.P. *Izmereniya v dispersnykh potokakh* [Dispersed flow measurements], Moscow: Energiya, 1971, 248 p. (In Russ.).

21. Mizonov V., Balagurov I., Berthiaux H., Gatamel C. Gatamel Markov chain model of mixing kinetics for ternary mixture of dissimilar particulate solids. *Particuology*, 2016, vol. 31, pp. 80-86. doi: 10.1016/j.partic.2016.05.006

22. Zhuang Y., Chen X., Liu D. Stochastic bubble developing model combined with Markov process of particles for bubbling fluidized beds. *Chemical Engineering Journal*, 2016, vol. 291, pp. 206-214. doi: 10.1016/j.cej.2016.01.095

23. Kapranova A., Verloka I., Bahaeva D. Factors of Increasing the performance of the bulk material mixer of the gravity type. In: Anatolijs B., Nikolai V., Vitalii S. (Eds.) *Proceedings of EECE 2019. EECE 2019. Lecture Notes in Civil Engineering*, Springer, Cham, 2020, 2020, vol. 70, pp. 337-347. doi: 10.1007/978-3-030-42351-3_30

24. Kapranova A., Bahaeva D., Stenko D., Fedorova D., Vatagin A., Lebedev A. Stochastic analysis of impact mixing of bulk materials in a rotary apparatus, *E3s Web of Conference*, 2021, vol. 247, p. 01048, published online 05 April 2021. doi: 10.1051/e3sconf/202124701048

25. Kapranova A.B., Stenko D.V., Bahaeva D.D., Vatagin A.A., Lebedev A.E. [Analysis of the efficiency of mixing granular raw materials in the preparation of a cyberphysical platform], *Matematicheskiye metody v tekhnologiyakh i tekhnike* [Mathematical methods in technologies and engineering]. St. Petersburg, 2021, no. 1, pp. 110-115. (In Russ.).

26. Kapranova A.B., Stenko D.V., Bahaeva D.D., Vatagin A.A., Lebedev A.E. Analysis of the efficiency of the rotary method for producing a mixture of granular raw materials in the preparation of a cyber-physical platform. In: Kravets A.G., Bolshakov A.A., Shcherbakov M. (Eds). *Cyber-Physical Systems: Modelling and Industrial Application, Studies in Systems, Decision and Control*. Springer Nature Switzerland AG 2022, 2022, vol. 418, pp. 299-310. doi: 10.1007/978-3-030-95120-7_25

Effizienzfaktoren des Rotationsmischens körniger Rohstoffe für die cyber-physikalische Plattform

Zusammenfassung: Es ist ein Verfahren zur Bewertung der Effizienz des Rotationsmischens der angegebenen Art von Schüttgütern anhand des Grades der Nähe der Änderungsbereiche der Extremwerte der Winkel vorgeschlagen, die die resultierenden Strömungen der Komponentenpartikel charakterisieren. Die Hauptkonstruktionsmerkmale des Rotationsmischens umfassen: Winkelverschiebungen von zwei Reihen von unidirektionalen elastischen rechteckigen Schaufeln, die tangential zur zylindrischen Oberfläche der Mischtrommel angeordnet sind. Die Modellierung der Verteilungsgesetze von körnigen Materialien ist auf der Grundlage der Energiemethode unter Berücksichtigung der Parameter der Rotationsmischung durchgeführt, um eine entsprechende cyber-physikalische Plattform vorzubereiten.

Facteurs d'efficacité du mélange rotatif des matières premières granulaires pour la plate-forme cyberphysique

Résumé: Est proposé le moyen d'évaluer l'efficacité du mélange rotatif du type indiqué de matière en vrac en fonction du degré de proximité des plages de variation des valeurs extrêmes des angles caractérisant les flux de particules des composants obtenus. Les principales caractéristiques de conception du mélange rotatif sont les décalages angulaires de deux rangées de pales rectangulaires élastiques unidirectionnelles situées tangentiellement à la surface du tambour de mélange. La modélisation des lois de distribution des matériaux granulaires est réalisée à la base du procédé énergétique, en tenant compte des paramètres de mélange rotatif, afin de préparer une plate-forme cyber-physique appropriée.

Авторы: *Капранова Анна Борисовна* – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика»; *Стенько Дмитрий Владимирович* – аспирант кафедры «Теоретическая и прикладная механика»; *Бахаева Дарья Дмитриевна* – старший преподаватель кафедры «Информационные системы и технологии»; *Ватагин Александр Александрович* – аспирант кафедры «Технологические машины и оборудование»; *Лебедев Антон Евгеньевич* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Ярославль, Россия.