

Об оценке содержания ключевого компонента после ударного рассеивания сыпучих материалов на начальном этапе порционного смешивания

А.Б. Капранова, И.И. Верлока
ФГБОУВПО «Ярославский государственный технический университет»,
г. Ярославль, Российская Федерация
E-mail: kapranova_anna@mail.ru; compvii@rambler.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Однородные композиты с регламентируемыми физико-механическими свойствами, в том числе сыпучие, широко используются для нужд тепловой энергетики и атомной промышленности. Актуальная проблема получения качественной смеси с заданным соотношением объемных долей сыпучих компонентов, например 1:10 и более, может быть решена с помощью устройств гравитационного типа, в которых реализуется принцип порционного смешивания твердых дисперсных компонентов в разреженных потоках. Формирование указанных разреженных потоков достигается различными способами: при работе щеточных элементов и ударном взаимодействии с отбойной поверхностью.

Материалы и методы: Использован стохастический метод математического моделирования, основанный на неравновесном представлении состояний энергетически открытой макросистемы.

Результаты: Рассматривается вопрос об оценке содержания ключевого компонента после ударного рассеивания сыпучих материалов на начальном этапе порционного смешивания с привлечением стохастического подхода. Моделирование выполнено с учетом механических свойств усредненных разреженных потоков материалов при ударе о плоскую отбойную поверхность. Предложен метод оценки объемной доли ключевого компонента после ударного рассеивания сыпучих материалов на начальном этапе порционного смешивания в рабочей камере гравитационного устройства. В рамках данного метода использованы неравновесные дифференциальные функции распределения числа частиц смешиваемых компонентов по углу их разбрасывания после ударного взаимодействия с плоским отбойником. Приведены примеры расчета указанных функциональных зависимостей для распределения частиц компонентов в разреженных потоках при смешивании двух сыпучих материалов.

Выводы: Теоретически выявлены условия возможного получения качественной сыпучей смеси в рабочей камере гравитационного устройства на начальном этапе порционного смешивания вследствие полученного сближения кривых для неравновесных дифференциальных функций распределения числа частиц для двух компонентов по углу их разбрасывания после ударного взаимодействия с отбойной поверхностью. Результаты могут быть использованы для расчета коэффициента неоднородности смеси не только на начальном, но и на последующих стадиях исследуемого процесса порционного смешивания твердых дисперсных сред.

Ключевые слова: сыпучие компоненты, гравитационное устройство, порционное смешивание, начальная стадия, стохастичность, неравновесный процесс, функция распределения, угол разбрасывания.

Key component content estimation after impact dispersion of bulk materials at the initial stage of batch mixing

A.B. Kapranova, I.I. Verloka
Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation
E-mail: kapranova_anna@mail.ru; compvii@rambler.ru

Abstract

Background: Homogeneous composites with regulated physical and mechanical properties including bulk materials are widely used for the needs of thermal power and nuclear industries. The urgent problem of obtaining a high-quality mix with a predetermined ratio of the volume fractions of loose components such as 1:10 and more can be solved with the help of gravity devices, which implement the principle of batch mixing of solid dispersed components in rarefied flows. These rarefied flows are formed in different ways: with brush elements and impact interaction with the baffle surface.

Materials and methods: The stochastic method of mathematical modeling based on non-equilibrium representation of energetically open macrosystem states was used.

Results: In this paper we consider the question of evaluating the content of a key component after impact dispersion of bulk materials at the initial stage of batch mixing involving the stochastic approach. Simulation takes into account mechanical properties of averaged rarefied flows of materials on impact with the flat baffle surface. A method has been proposed for estimating the volume fraction of the key component after impact dispersion of bulk materials at the initial stage of batch mixing in the gravitational device chamber. This method employs the differential non-equilibrium function of mixed component particle distribution by the angle of their atomization after impact interaction with the flat baffle plate. Examples are given to illustrate calculation of these functional relationships for distribution of component particles in rarefied flows when blending two loose materials.

Conclusions: Conditions have been theoretically identified that make it possible to obtain quality loose mixture in the working chamber of the gravitational device at the initial stage of batch mixing as a result of curves convergence for differential non-equilibrium distribution functions of particle number for the two components by the angle of their atomization

after impact interaction with the baffle surface. The results can be used to calculate the coefficient of mixture heterogeneity not only at the initial, but also at later stages of solid dispersive media batch mixing.

Key words: loose components, gravitational device, batch mixing, initial stage, stochasticity, non-equilibrium process, distribution function, atomization angle.

DOI:10.17588/2072-2672.2016.3.078-083

Широкое применение композитов с регламентируемыми физико-механическими свойствами, как однородных продуктов из совокупности различных материалов, в том числе сыпучих, для нужд тепловой энергетики и атомной промышленности приводит к необходимости совершенствования соответствующего смесительного оборудования [1, 2]. Прогнозируемость уникальных указанных свойств композиционных материалов является основной задачей их производства. При этом особую актуальность приобретает проблема получения качественной сыпучей смеси, в первую очередь по отношению к степени однородности, в заданном соотношении объемных долей ее компонентов, например 1:10 и более¹.

Задача получения данного сыпучего продукта может быть успешно решена на принципе формирования разреженных потоков, в частности, в аппаратах центробежного действия, на подвижной ленте и в смесителе гравитационного типа. В рамках разработки гравитационного устройства для усиления эффекта разрежения смешиваемых сыпучих компонентов, разбрасываемых щеточными элементами вращающегося барабана, дополнительно используются плоские отбойники. Ограничимся описанием рабочей камеры начального этапа смешивания. Условная схема ударного взаимодействия сыпучих компонентов с плоским отбойником в гравитационном смесителе на начальном этапе порционного смешивания показана на рис. 1.

Заметим, что первоначально сыпучий материал с меньшим содержанием в готовом продукте подается в заданном регламентном соотношении, а второй материал – в выбранной доле от его полного содержания в смеси. Данные компоненты обозначены индексами соответственно «1» и «2». При этом слои 2 указанных сыпучих компонентов, дозируемые в заданных пропорциях, сползая с лотка 5 после подачи из бункера-дозатора 1 и поступая в зазор между лотком 5 и барабаном 3, разбрасываются его щеточными элементами (билами) 4 и после ударного взаимодействия с плоским отбойником 6 смешиваются в указанных пропорциях. С обоих торцов смесительного барабана 3 на его цилиндрической поверхности била 4 имеют винтовую навивку противоположного направления. Элемент опытного стенда для получения

разреженных потоков сыпучих компонентов после срыва с концов бил при ударном взаимодействии с плоским отбойником представлен на рис. 2.

В качестве конструктивных параметров начального этапа смешивания (рис. 1) в гравитационном устройстве выбраны: r_b и L_b – радиус и длина барабана 3; l_b – длина бил 4; h_s – шаг их винтовой навивки; δ_0 – угол наклона лотка 5 к вертикальному направлению. К режимным параметрам относятся: ω – угловая скорость вращения смесительного барабана 3; h_0 – высота зазора между лотком 5 и барабаном 3; δ_1 – угол наклона плоского отбойника 6 к поверхности лотка 5.

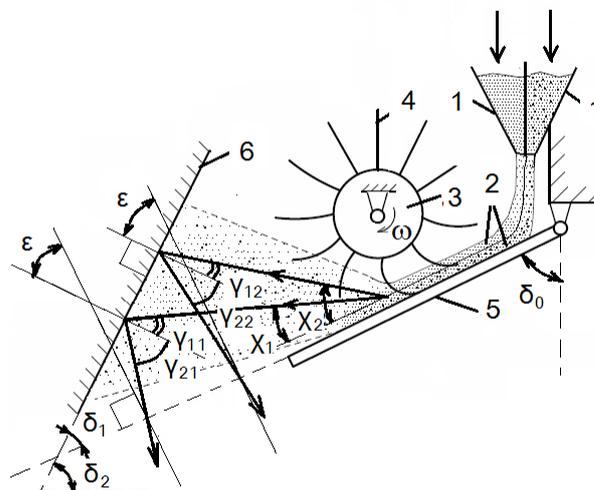


Рис. 1. Условная схема ударного взаимодействия сыпучих компонентов с плоским отбойником в гравитационном смесителе на начальном этапе порционного смешивания: 1 – бункер-дозатор; 2 – слои компонентов; 3 – вращающийся барабан; 4 – щеточные элементы (била); 5 – лоток; 6 – отбойник

Для оценки содержания ключевого компонента C_1 после ударного рассеивания сыпучих материалов на начальном этапе их порционного смешивания предлагается использовать методы стохастического моделирования [3, 4]. В [5] выполнено сравнение стохастических описаний процесса формирования разреженных потоков после их срыва с бил, закрепленных различными способами на поверхности смесительного барабана – с одной винтовой навивкой (в модели с подвижной лентой [6]) и с двумя противоположно направленными навивками с двух его торцов (рис. 2). В первом случае указанный процесс считается равновесным (индекс «ер») и описывается в формализме Орнштейна-Уленбека, а во втором – неравновесным (индекс «нр») вследствие присутствия

¹ Бакин М.Н. Совершенствование процесса смешивания сыпучих материалов в новом аппарате с подвижной лентой: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08. – Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2014. – 17 с.

флуктуаций состояний энергетически открытой макросистемы за счет столкновений частиц симметрично образующихся разреженных потоков сыпучих компонентов по отношению к торцам смесительного барабана.

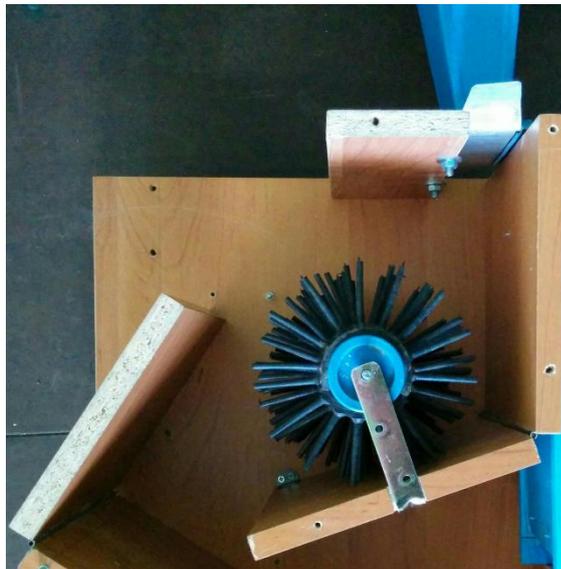


Рис. 2. Элемент опытного стенда для получения разреженных потоков сыпучих компонентов после срыва с концов бил при ударном взаимодействии с плоским отбойником

Применяя аналогию с моделью², содержание ключевого компонента C_1 получаемой смеси предлагается связать с соответствующими дифференциальными функциями распределения числа частиц по выбранному характеристическому углу. Тогда предлагается значение C_1 на начальном этапе их порционного смешивания вычислить с помощью набора неравновесных дифференциальных функций распределения $g_{ij}^{(np)}(\gamma_{2i})$ для числа частиц по углу их разбрасывания γ_{2i} для i -го компонента ($i = 1, \dots, n_k$) после ударного взаимодействия с плоским отбойником при срыве с j -го деформированного щеточного элемента (била) при $j = 1, \dots, n_b$:

$$C_1 = \rho_{T1} \prod_{j=1}^{n_b} g_{1j}^{(np)}(\gamma_{21}) \left\{ \sum_{i=1}^{n_k} \rho_{Ti} \prod_{j=1}^{n_b} g_{ij}^{(np)}(\gamma_{2i}) + \right. \\ \left. + \rho_{T2} \Delta k_2^{(1)} \prod_{j=1}^{n_b} g_{2j}^{(np)}(\gamma_{22}) \right\}^{-1}, \quad (1)$$

где ρ_{Ti} – плотность вещества i -го сыпучего материала; $\Delta k_2^{(1)} = k_2^{(1)} - k_1^{(1)}$ – разность между объемными долями для материалов «2» и «1» (нижние индексы) для начальной стадии смешивания (верхний индекс «(1)») при соотношении объемов компонентов $V_1^{(1)}:V_2^{(1)} = k_1^{(1)}:k_2^{(1)}$.

Например, в [1] расчет $\Delta k_2^{(1)}$ осуществляется в зависимости от числа стадий порционного смешивания n_r по формуле

$$\Delta k_2^{(1)} = \left| (n_r + k_1^{(1)}) / 2^{n_r-1} - 2k_1^{(1)} \right|, \quad (2)$$

где n_r – объемная доля сыпучего материала, большего в составе готового продукта при

соотношении объемов его составляющих $V_1:V_2 = 1:n_r$.

Введение полных неравновесных дифференциальных функций распределения $G_i^{(np)}(\gamma_{2i})$ для числа частиц по углу их разбрасывания γ_{2i} для i -го компонента в виде

$$G_i^{(np)}(\gamma_{2i}) = \prod_{j=1}^{n_b} g_{ij}^{(np)}(\gamma_{2i}) \quad (3)$$

позволяет перейти к следующему представлению выражения (1):

$$C_1 = \rho_{T1} G_1^{(np)}(\gamma_{21}) \left\{ \sum_{i=1}^{n_k} \rho_{Ti} G_i^{(np)}(\gamma_{2i}) + \right. \\ \left. + \rho_{T2} \Delta k_2^{(1)} G_2^{(np)}(\gamma_{22}) \right\}^{-1}. \quad (4)$$

Заметим, что входящие в выражения (1), (3), (4) значения угла разбрасывания γ_{2i} для i -го компонента (рис. 1) соответствуют усредненным углам отражения рассеиваемых потоков сыпучих компонентов после удара об отбойную поверхность. Углы падения γ_{1i} для i -го компонента, показанные на рис. 1, относятся к направлениям усредненных скоростей налетающих на отбойник потоков сыпучих материалов.

Определение функциональных зависимостей $G_i^{(np)}(\gamma_{2i})$ и $g_{ij}^{(np)}(\gamma_{2i})$ связано с переходом к новому аргументу α_{ij} в наборе неравновесных дифференциальных функций распределения $\Phi_i^{(np)}(\alpha_{ij})$ и $F_{ij}^{(np)}(\alpha_{ij})$ для числа частиц i -го компонента при срыве с j -го била 4 смесительного барабана 3 (рис. 1) по углу рассеивания α_{ij} , отсчитываемому от перпендикуляра к лотку под барабаном:

$$\Phi_i^{(np)}(\alpha_{ij}) = \prod_{j=1}^{n_b} F_{ij}^{(np)}(\alpha_{ij}); \quad (5)$$

$$F_{ij}^{(np)}(\alpha_{ij}) = (\mu_{ij} / \lambda_{ij}) \exp[-\lambda_{ij}^2 w_4 w_0^2 (\alpha_{ij} + \varphi_{ij})^2 \times \\ \times (w_1 w_2)^{-1}] \times \{ \text{erf}[(\lambda_{ij} / w_3)] [1 + \\ + w_0 w_3 (\alpha_{ij} + \kappa_{ij})]^2 - \text{erf}(\lambda_{ij} / w_3) \}, \quad (6)$$

где показатели μ_{ij} , λ_{ij} , w_0 , w_4 и w_{ki} при $k = 1, 2, 3$ функционально связаны с конструктивно-режимными параметрами барабана и физико-механическими характеристиками сыпучих материалов.

Заметим, что выражение (6) получено при стохастическом моделировании неравновесного процесса рассеивания сыпучих компонентов щеточными элементами с учетом взаимодействия каждой частицы с биллом, обладающим угловой жесткостью, а также поступательного движения этих частиц и случайного характера их моментов импульсов. При этом расчет числа частиц в выделенном элементе фазового объема производится в зависимости от двух параметров – энергии макросистемы в момент ее стохастизации и потери энергии этой макросистемы при макромасштабных флуктуациях ее состояния (столкновениях частиц симметрично сформированных потоков сыпучих сред по отношению к торцам смесительного барабана).

² Там же.

Рассмотрим предлагаемый способ перехода от угла α_{ij} к углу γ_{2i} в наборе функций $\Phi_i^{(np)}(\alpha_{ij})$ и $F_{ij}^{(np)}(\alpha_{ij})$. В [6] выполнено моделирование направления скорости срыва частиц i -го компонента с j -го била в зависимости от характеристических углов φ_{ij} (описывающего изгиб деформированного била) и β_{ij} (между указанной скоростью и касательным вектором на конце изогнутого била) и конструктивно-режимных параметров смесительного элемента устройства:

$$\varphi_{ij} = \pi/2 + \alpha_{ij} - \zeta_1 \arcsin \zeta_2; \quad (7)$$

$$\beta_{ij} = \arctg[2h_s(l_b - h_0)/\zeta_3]. \quad (8)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$\zeta_1 = [(r_b \sin \sigma_{ij})^2 + (r_b + h_0)^2] / (r_b + h_0);$$

$$\zeta_2 = 1 + d_0 [2h_s(l_b - h_0)/L_b]^2 / d_1^{1/2};$$

$$\zeta_3 = L_b \{ r_b + h_0 + (l_b - h_0)[1 - 2h_s(\alpha_{ij} + \varphi_{ij})/L_b] \};$$

σ_{ij} – угол между радиальной направляющей деформированного била и хордой его дуги, соединяющей конец гибкого элемента и точку его крепления на барабане;

$$d_1 = \sin^2 \sigma_{ij} - 4^{-1} r_b^2 (r_b + l_b)^{-2} \sin^2 2\sigma_{ij};$$

$$d_0 = [\varepsilon_0^{-1} - \varepsilon_0 (r_b + l_b)^{-2}] \cos \sigma_{ij}.$$

Значения σ_{ij} и ε_0 также зависят от перечисленных ранее параметров барабана r_b , L_b , l_b , h_s , h_0 .

С учетом выражений (7) и (8) предлагается соотношение связи для характеристических углов изучаемого процесса смешивания представить в форме

$$\chi_{ij} = \alpha_{ij} + \varphi_{ij} - \beta_{ij}, \quad (9)$$

где χ_{ij} – угол рассеивания частиц i -го компонента при срыве с j -го била, который отсчитывается от поверхности лотка под барабаном.

Пусть число деформированных бил с каждого торца барабана (рис. 2), с которых срываются частицы i -го компонента, равно n_b . Следовательно, для i -го материала после срыва со щеточных элементов с каждого торца вращающегося барабана усредненные значения углов рассеивания α_{ij} (от перпендикуляра к лотку) и χ_{ij} (от поверхности лотка) рассчитываются согласно (9):

$$\alpha_i \equiv \sum_{j=1}^{n_b} \alpha_{ij}; \quad (10)$$

$$\chi_i = n_b^{-1} \left(\alpha_i + \sum_{j=1}^{n_b} \varphi_{ij} - \sum_{j=1}^{n_b} \beta_j \right). \quad (11)$$

Таким образом, используя выражения (7), (8) и (11), а также результаты [7] оценки $k_{Vi} = \sin \gamma_{1i} / (\sin \gamma_{2i})$ – коэффициента восстановления [8] частиц сыпучих компонентов при ударном взаимодействии с отбойником, имеем

$$\alpha_i(\gamma_{2i}) = n_b [f(\gamma_{2i}) + \sum_{j=1}^{n_b} \beta_j - \sum_{j=1}^{n_b} \varphi_{ij}], \quad (12)$$

где δ_0 – угол отклонения лотка под барабаном от вертикального направления; δ_2 – угол между горизонталью и плоским отбойником (рис. 1).

Входящая в (12) зависимость $f(\gamma_{2i}) = \pi - \delta_0 - \delta_1 - \gamma_{2i}/k_{Vi}(\gamma_{2i})$, согласно методике расчета коэффициента восстановления k_{Vi} [7, 8], принимает вид

$$f(\gamma_{2i}) = \xi_0 \xi_1 - \xi_{2i} + (2\xi_1)^{-1} [(\xi_0 \xi_1 + \xi_{2i})^2 - 4\xi_1 \gamma_{2i}]^{1/2}, \quad (13)$$

где $\xi_0 = \pi - \delta_2 - \delta_0$; $\xi_1 = (\pi/2 + \xi_0) Q_{1i} \sin \varepsilon$;

$$\xi_{2i} = Q_{1i} [(\pi/2 + \xi_0) \cos \varepsilon - Q_{2i}]; \quad \eta_i = q_{1i} / q_{2i};$$

$$\xi_{3i} = \eta_i - \text{ctg}(\pi/2 - \xi_0);$$

$$Q_{2i} = (\pi/2 + \xi_0 + \xi_{3i}) \times \cos(\pi/2 - \xi_0);$$

$$Q_{1i} = [1 - (\pi/2 + \xi_0) \xi_{3i}] / (2\xi_{3i} [1 + \xi_{3i}]);$$

угол ε – угол между перпендикулярами к отбойнику и лотку под смесительным барабаном (рис. 1); q_{1i} – расстояния, на которые разбрасываются частицы i -го компонента вдоль линии лотка под барабаном; q_{1i} – высоты между данным лотком и отбойником к точке ударного взаимодействия усредненного потока i -го компонента.

Тогда с учетом формулы (10) подстановкой выражения (12) в (6) можно получить набор неравновесных дифференциальных функций распределения $g_i^{(np)}(\gamma_{2i})$, входящий в (3), для числа частиц по углу их разбрасывания γ_{2i} для i -го компонента после ударного взаимодействия с плоской отбойной поверхностью:

$$g_{ij}^{(np)}(\gamma_{2i}) = (\mu_{ij} / \lambda_{ij}) \exp[-\lambda_{ij}^2 w_4 w_0^2 [\alpha_i(\gamma_{2i}) + \varphi_{ij}]^2 (w_{1i} w_{2i})^{-1}] \{ \text{erf}[(\lambda_{ij} / w_{3i})] [1 + w_0 w_{3i} \times [\alpha_i(\gamma_{2i}) + \varphi_{ij}]^2 - \text{erf}(\lambda_{ij} / w_{3i})] \}. \quad (14)$$

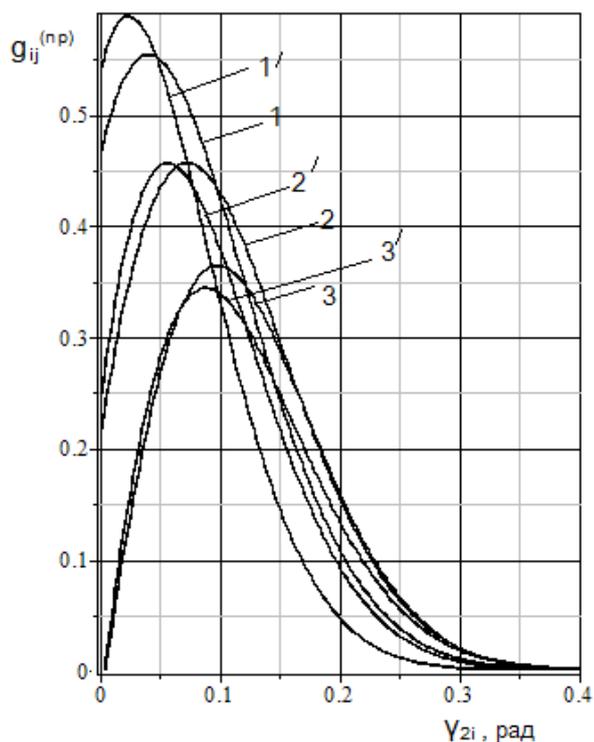
Применим предложенную стохастическую модель получения функциональных зависимостей $G_i^{(np)}(\gamma_{2i})$ и $g_{ij}^{(np)}(\gamma_{2i})$ к примеру смешивания двух сыпучих компонентов (рис. 3): природного песка ГОСТ 8736-93 ($i = 1$) и манной крупы ГОСТ 7022-97 ($i = 2$). Зададим значения параметров смесительного барабана:

- конструктивных: $r_b = 3,0 \cdot 10^{-2}$ м; $L_b = 1,85 \cdot 10^{-2}$ м; $l_b = 4,5 \cdot 10^{-2}$ м; $h_s = 1,6 \cdot 10^{-2}$ м; $\delta_0 = 1,3089$ рад;

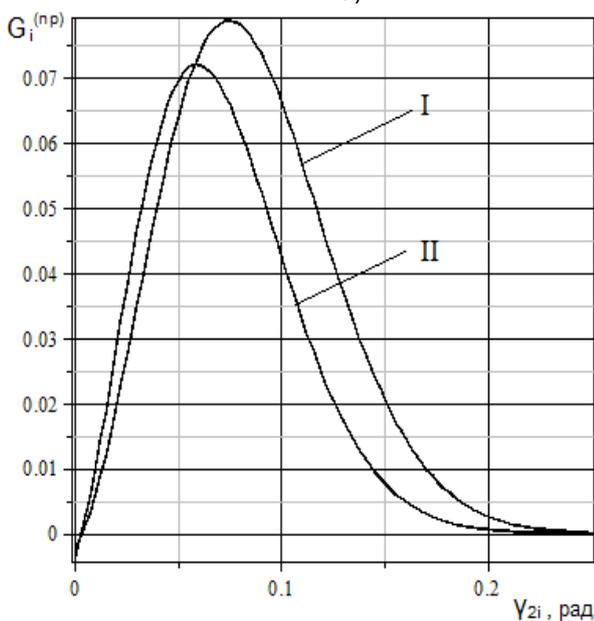
- режимных: $\omega = 52,36$ с⁻¹; $h_0 = 3,0 \cdot 10^{-2}$ м; $\delta_2 = 0,9599$ рад;

- характеристических показателей процесса смешивания: $n_b = 3$; $q_{11} = 2,4 \cdot 10^{-1}$ м; $q_{11} = 6,0 \cdot 10^{-2}$ м; $q_{12} = 2,8 \cdot 10^{-1}$ м; $q_1 = 8,0 \cdot 10^{-2}$ м; $\varepsilon = 0,7071$ рад.

В случае, когда сыпучие материалы сбрасываются первыми тремя деформированными щеточными элементами ($n_b = 3$) в проекции на плоскость сечения смесительного барабана, перпендикулярную оси его вращения, кривые неравновесных дифференциальных функций распределения $g_i^{(np)}(\gamma_{2i})$ для числа частиц по углу их разбрасывания γ_{2i} для i -го компонента имеют вид, представленный на рис. 3,а.



а)



б)

Рис. 3. Зависимости для набора неравновесных дифференциальных функций распределения для числа частиц сыпучих материалов по углу разбрасывания после ударного взаимодействия с плоским отбойником: $h_s = 1,6 \cdot 10^{-2}$ м; $\omega = 52,36$ с $^{-1}$, $\delta_2 = 0,9599$ рад; а – $g_{ij}^{(np)}(\gamma_{2i})$; (1–3) – природный песок ГОСТ 8736-93 ($i = 1$); (1'–3') – манная крупа ГОСТ 7022-97 ($i = 2$); 1 и 1' – $j = 1$; 2 и 2' – $j = 2$; 3 и 3' – $j = 3$; б – $G_i^{(np)}(\gamma_{2i})$; (I) – природный песок ГОСТ 8736-93 ($i = 1$); (II) – манная крупа ГОСТ 7022-97 ($i = 2$)

Анализ графиков (рис. 3) показывает, что зависимости $g_i^{(np)}(\gamma_{2i})$ для природного песка ГОСТ 8736-93 ($i = 1$; $\rho_{T1} = 1,525 \cdot 10^3$ кг/м 3) расположены правее, чем для манной крупы ГОСТ 7022-97 ($i = 2$; $\rho_{T2} = 1,440 \cdot 10^3$ кг/м 3).

Усредненные диаметры частиц, входящие в расчет показателей μ_{ij} , λ_{ij} , W_0 , W_4 и W_{ki} в

выражении (14), для указанных материалов имеют следующие значения: $d_{s1} = 1,5 \cdot 10^{-4}$ м и $d_{s2} = 4,0 \cdot 10^{-4}$ м. В частности, разность максимальных углов разбрасывания материалов одними и теми же щеточными элементами не превышает 0,025 рад (рис. 3,а, графики 1 и 1', 2 и 2', 3 и 3'). При этом после ударного взаимодействия с плоским отбойником материалы рассеиваются под углом γ_{2i} , меньшим в (2,58–3,62) раза для гибких бил, которые последними покинули зазор между лотком и барабаном (рис. 3,а, $j = 1$, кривые 1 и 1'), в сравнении с углами γ_{2i} для частиц, которые первоначально разбрасываются щеточными элементами, которые первыми из выделенных бил освободились от частиц смешиваемых компонентов (рис. 3,а, $j = 3$, кривые 3 и 3').

Особый интерес представляют графики зависимостей $G_i^{(np)}(\gamma_{2i})$ для полных неравновесных дифференциальных функций распределения числа частиц i -го компонента по углу их разбрасывания γ_{2i} , показанные на рис. 3,б. Для указанных типов сыпучих сред ($i = 1,2$) отношение максимальных значений углов разбрасывания $\gamma_{21}^{max}/\gamma_{22}^{max}$ в выбранном диапазоне изменения угла наклона отбойной поверхности $\delta_2 = (0,9–1,1)$ рад не превышает 1,15 единиц. Например, для «пиковых» значений γ_{21} и γ_{22} , относящихся соответственно к кривым I и II (рис. 3,б), данное отношение равно 1,14. При этом наблюдается сближение данных кривых I и II для $G_1^{(np)}(\gamma_{21})$ и $G_2^{(np)}(\gamma_{22})$, что теоретически подтверждает возможность качественного смешивания природного песка ГОСТ 8736-93 ($i = 1$) и манной крупы ГОСТ 7022-97 ($i = 2$).

Полученные результаты для указанных неравновесных функций оказываются более предпочтительными по сравнению с равновесными, представленными в [6] при стохастическом моделировании рассеивания частиц сыпучих компонентов на подвижной ленте после срыва с гибких элементов смесительного барабана, имеющих однонаправленную навивку на его поверхности.

Таким образом, полученные результаты для процесса смешивания сыпучих компонентов после ударного взаимодействия с плоской отбойной поверхностью в виде выражений (3) и (14) для зависимостей $G_i^{(np)}(\gamma_{2i})$ и $g_{ij}^{(np)}(\gamma_{2i})$ могут быть использованы при расчете содержания ключевого компонента C_1 получаемой смеси с помощью соотношения (4). В свою очередь, формула (4) предлагается для использования в оценочных расчетах качества смеси, например при вычислении коэффициента неоднородности согласно известным подходам [9].

Список литературы

1. Оптимальное управление смешиванием сегрегирующих дисперсных материалов / В.Е. Мизонов,

H. Berthiaux, C. Gatumel, K.A. Шелатонова // Вестник ИГЭУ. – 2014. – Вып. 2. – С. 50–54.

2. **Влияние** пристеночного эффекта на вибрационное смешивание дисперсных материалов / И.А. Балагуров, В.Е. Мизонов, Н. Berthiaux, C. Gatumel // Вестник ИГЭУ. – 2015. – Вып. 2. – С. 58–62.

3. **Климонтovich Ю.Л.** Турбулентное движение и структура хаоса: Новый подход к статистической теории открытых систем. – М.: ЛЕНАНД, 2014. – 328 с.

4. **Зайцев А.И., Бытев Д.О.** Ударные процессы в дисперсно-пленочных системах. – М.: Химия, 1994. – 176 с.

5. **Капранова А.Б., Верлока И.И., Зайцев А.И.** Сравнительный анализ равновесных и неравновесных функций распределения смешиваемых сыпучих сред // Математические методы в технике и технологиях (ММТТ-28): сб. тр. XXVIII Междунар. науч. конф. в 12 т. Т. 8. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2015; Ярославль: Ярослав. гос. техн. ун-т; Рязань: Рязанск. гос. радиотехн. ун-т, 2015. – С. 223–227.

6. **Бакин М.Н., Капранова А.Б., Верлока И.И.** Исследование распределения сыпучих компонентов в рабочем объеме барабанно-ленточного смесителя // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 5 (Ч. 5). – С. 928–933.

7. **Оценка** параметра восстановления ударно-взаимодействующих потоков твердых дисперсных сред с наклонным отбойником / А.Б. Капранова, М.Н. Бакин, А.Е. Лебедев, А.И. Зайцев // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – Иваново, 2013. – Т. 56, вып. 8. – С. 111–113.

8. **Бутенин Н.В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р.** Курс теоретической механики. Т. 2. – М.: Наука, 1979. – 544 с.

9. **Макаров Ю.И.** Аппараты для смешения сыпучих материалов. – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с.

References

1. Mizonov, V.E., Berthiaux, H., Gatumel, C., Shelatunova, K.A. Optimal'noe upravlenie smeshivaniem segregiruyushchikh dispersnykh materialov [Optimal control of segregating disperse materials]. *Vestnik IGEU*, 2014, no. 2, pp. 50–54.

2. Balagurov, I.A., Mizonov, V.E., Berthiaux, H., Gatumel, C. Vliyaniye pristenochnoy efekta na vibratsionnoye smeshivaniye dispersnykh materialov [Wall effect influence on

vibratory mixing of particulates]. *Vestnik IGEU*, 2015, issue 2, pp. 58–62.

3. Klimontovich, Yu.L. *Turbulentnoye dvizheniye i struktura khaosa: Novy podkhod k statisticheskoy teorii otkrytykh system* [Turbulent motion and chaos structure: A new approach to statistical theory of open systems]. Moscow, LENAND, 2014. 328 p.

4. Zaytsev, A.I., Bytev, D.O. *Udarnye protsessy v dispersno-plenochnykh sistemakh* [Impact processes in film disperse systems]. Moscow, Khimiya, 1994. 176 p.

5. Kapranova, A.B., Verloka, I.I., Zaytsev, A.I. Sravnitel'nyy analiz ravnovesnykh i neravnovesnykh funktsiy raspredeleniya smeshivaemykh sypuchikh sred [Comparison of equilibrium and non-equilibrium functions of distribution of loose media under mixing]. *Sbornik trudov XXVIII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh» (ММТТ-28) v 12 t., t. 8* [Collected works of the XXVIIIth international scientific conference «Mathematical methods in engineering and technologies» (ММТТ-28), in 12 vol., vol. 8]. Saratov, Saratovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskyy universitet, 2015; Yaroslavl', Yaroslavskiy gosudarstvennyy tekhnicheskyy universitet; Ryazan', Ryazanskiy gosudarstvennyy radiotekhnicheskyy universitet, 2015, pp. 223–227.

6. Bakin, M.N., Kapranova, A.B., Verloka, I.I. Issledovaniye raspredeleniya sypuchikh komponentov v rabochem ob'eme barabanno-lentochnoy smesitelya [Research into distribution of loose components in the working volume of the rotaty-drum ribbon mixer]. *Fundamental'nye issledovaniya*, 2014, no. 5 (Ch. 5), pp. 928–933.

7. Kapranova, A.B., Bakin, M.N., Lebedev, A.E., Zaytsev, A.I. Otsenka parametra vosstanovleniya udarno-vzaimodeystvuyushchikh potokov tverdykh dispersnykh sred s naklonnym otboynikom [Assessment of recovery parameter of impact interacting flows of solid dispersion media with an inclined baffle]. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2013, vol. 56, issue 8, pp. 111–113.

8. Butenin, N.V., Lunts, Ya.L., Merkin, D.R. *Kurs teoreticheskoy mekhaniki. T. 2* [A course of mechanics theory]. Moscow, Nauka, 1979. 544 p.

9. Makarov, Yu.I. *Apparaty dlya smesheniya sypuchikh materialov* [Apparatuses for mixing bulk materials]. Moscow, Mashinostroeniye, 1973. 216 p.

Капранова Анна Борисовна,

ФГБОУВПО «Ярославский государственный технический университет»,

доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры теоретической механики и сопротивления материалов,

e-mail: kapranova_anna@mail.ru

Верлока Иван Игоревич,

ФГБОУВПО «Ярославский государственный технический университет»,

аспирант кафедры теоретической механики и сопротивления материалов,

e-mail: compvii@rambler.ru