

О ВЛИЯНИИ КОМПЛЕКСНОГО ПАРАМЕТРА ГРАВИТАЦИОННОГО АППАРАТА НА КАЧЕСТВО СМЕСИ ПОСЛЕ ПЕРВОЙ СТАДИИ СМЕШИВАНИЯ

А. Б. Капранова, И. И. Верлока, П. А. Яковлев, Д. Д. Бахаева

*Кафедра теоретической механики и сопротивления материалов,
ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет»,
г. Ярославль, Россия; kapranova_anna@mail.ru*

Ключевые слова: гравитационный смеситель; коэффициент неоднородности; отбойник; порционное смешивание; сыпучие материалы; функции распределения; щеточные элементы.

Аннотация: Предложен способ оценки качества смеси на первой стадии смешивания сыпучих компонентов в смесителе гравитационного типа на основе стохастической модели процесса образования разреженных потоков. Анализ полученных зависимостей для коэффициента неоднородности сыпучей смеси показал существенное влияние на процесс смешивания комплексного конструктивно-режимного параметра, характеризующего степень деформации щеточных элементов.

Порционное смешивание сыпучих компонентов применяется на многих производственных предприятиях различных направлений, в том числе пищевой и фармацевтической промышленности, для строительства дорожных покрытий, при изготовлении стекольной продукции и т.п.

При этом актуальность разработки соответствующего специального оборудования со временем не снижается в связи с необходимостью учета, с одной стороны, множества факторов, влияющих на качество смешивания, с другой, – особенностей технологического регламента, предъявляемого к готовой продукции. К последним требованиям относится достижение заданного соотношения между сыпучими компонентами, например, когда объемно-весовое содержание соответствует пропорции 1 : 10 и более. Для решения таких технологических задач могут быть использованы аппараты со смесительными элементами в виде жестких лопастей и упругих бил. Первые обычно реализуются в устройствах центробежного типа, вторые – в ленточных [1, 2] и гравитационных [1, 3 – 5] аппаратах.

В настоящей работе исследуется качество сыпучей смеси, получаемой в гравитационном аппарате при трехстадийном смешивании из двух компонентов, частицы которых при моделировании [3] условно принимаются за сферические и имеют сравнимые размеры.

Ряд новых гравитационных смесителей [4, 5] имеют над лотками в качестве дополнительных элементов барабанные устройства со щетками и отражательные (отбойные) наклонные поверхности для каждой из трех стадий работы аппаратов. Остановимся на первой стадии получения первичной сыпучей смеси при соотношении компонентов 1 : 10 и более.

При этом используем выражение для расчета объемно-весовых долей сыпучих компонентов на каждой из τ -стадии [4]. Для первой стадии ($\tau = 1$, верхний индекс) приращение второго компонента определяется величиной

$$\Delta\delta_2^1 = \delta_2^1 - \delta_1^1, \quad (1)$$

где δ_i^1 – объемные доли материалов «1» и «2» при $i = 1, 2$, задающие регламент для их объемов $V_1^1 : V_2^1 = \delta_1^1 : \delta_2^1$. Пусть материал «2» имеет $\delta_2^1 \gg \delta_1^1$.

Выполненное в работах [3 – 5] стохастическое моделирование позволило получить набор неравновесных функций распределения $W_{ij}(\varepsilon_{2i})$ для числа частиц компонента $i = 1, 2$ по углу отражения от наклонной отбойной поверхности ε_{2i} при учете срыва со щеточных деформированных элементов $j = \overline{1, n_b}$, спирально навитых на цилиндрическую поверхность смесительного барабана.

Вводя полные неравновесные функции распределения для числа частиц каждого компонента $R_1(\varepsilon_{21})$ и $R_2(\varepsilon_{22})$ соответственно в зависимости от углов отражения ε_{21} и ε_{22} :

$$R_1(\varepsilon_{21}) = \prod_{j=1}^{n_b} W_{1j}(\varepsilon_{21}); \quad (2)$$

$$R_2(\varepsilon_{22}) = \prod_{j=1}^{n_b} W_{2j}(\varepsilon_{22}), \quad (3)$$

можно оценить качество смеси по следующему критерию в виде коэффициента ее неоднородности

$$V_c^1 = 100 \left(\frac{\langle (c_1^1)^2 \rangle}{\langle c_1^1 \rangle^2} - 1 \right)^{1/2}, \quad (4)$$

где значения среднего $\langle c_1^1 \rangle$ от доли ключевого компонента «1» смеси (нижний индекс) c_1^1 и среднего от ее квадрата $\langle (c_1^1)^2 \rangle$ вычисляются согласно выражениям:

$$\langle c_1^1 \rangle = \frac{1}{(\varepsilon_{21\max} + \varepsilon_{21\min})} \frac{1}{(\varepsilon_{22\max} + \varepsilon_{22\min})} \int_{\varepsilon_{22\min}}^{\varepsilon_{22\max}} d\varepsilon_{22} \int_{\varepsilon_{21\min}}^{\varepsilon_{21\max}} c_1^1(\varepsilon_{21}, \varepsilon_{22}) d\varepsilon_{21}; \quad (5)$$

$$\langle (c_1^1)^2 \rangle = \frac{1}{(\varepsilon_{21\max} + \varepsilon_{21\min})} \frac{1}{(\varepsilon_{22\max} + \varepsilon_{22\min})} \int_{\varepsilon_{22\min}}^{\varepsilon_{22\max}} d\varepsilon_{22} \int_{\varepsilon_{21\min}}^{\varepsilon_{21\max}} [c_1^1(\varepsilon_{21}, \varepsilon_{22})]^2 d\varepsilon. \quad (6)$$

Распределения (2) и (3) используются при расчете доли ключевого компонента «1» смеси (нижний индекс) c_1^1 , полученной на первом этапе работы гравитационного устройства, в зависимости от физико-механических характеристик сыпучих материалов и конструктивно-режимных параметров смесителя

$$c_1^1(\varepsilon_{21}, \varepsilon_{22}) = \rho_{T1} R_1(\varepsilon_{21}) \left\{ \sum_{i=1}^{n_k} \rho_{Ti} R_1(\varepsilon_{2i}) + \rho_{T2} \Delta\delta_2^1 \prod_{j=1}^{n_b} R_2(\varepsilon_{22}) \right\}^{-1}, \quad (7)$$

где значение $\Delta\delta_2^1$ при условии

$$\frac{V_1^1}{V_2^1} = \frac{1}{n_V}, \quad (8)$$

согласно определению (1), вычисляется по формуле

$$\delta_2^1 = \left| \left[2^{-1}(n_V - 1) + 1 \right] (\tau - 1) - 1 \right| \delta_1^1, \quad \tau = \overline{2, n_\tau}. \quad (9)$$

Анализ качества получаемой сыпучей смеси выполняется при разделении множества параметров процесса смешивания на три группы: конструктивные

$(r_b, L_b, h_s, l_b, \mu_0, L_i, h_i)$; режимные $(h_L, h_0, \omega, \psi_1)$ и физико-механические для смешиваемых материалов (ρ_{Ti}, d_{Ti}) и щеточных элементов (k_u) .

Здесь обозначено: r_b, L_b – радиус и длина барабана; h_s – шаг винтовой навивки щеточных элементов; l_b – их длина; μ_0 – угол между вертикалью и лотком; L_i – ширина разброса частиц сорта i на лотке; h_i – кратчайшее расстояние между лотком и отбойником к точке удара усредненного потока частиц сорта i ; h_L – толщина слоев компонентов в барабанно-лотковом зазоре; h_0 – высота этого зазора; ω – угловая скорость вращения барабана; ψ_1 – угол между отбойником и горизонталью; ρ_{Ti} – истинная плотность вещества компонента сорта i ; d_{Ti} – усредненный диаметр частиц сорта i ; k_u – коэффициент угловой жесткости щеточного элемента.

В ходе опытных испытаний и теоретических расчетов получена целесообразность введения комплексного конструктивно-режимного параметра, отражающего степень деформирования щеточных элементов при их взаимодействии с лотком и слоями сыпучих компонентов после прохождения барабанно-лоткового зазора, аналогичного введенному в работе [6],

$$\Delta = l_b/h_0. \quad (10)$$

Особый интерес при выборе наиболее рациональных диапазонов изменения параметров процесса представляют следующие характеристики: угловая скорость вращения барабана ω ; угол между отбойником и горизонталью ψ_1 ; сформированный комплексный показатель Δ из формулы (10).

Расчет коэффициента неоднородности V_c^1 в соответствии с выражениями (4) – (7) в зависимости от двух указанных параметров ω и Δ позволяет спрогнозировать выбор рациональных пределов их изменения. На рисунке 1 приведены теоретические и экспериментальные зависимости $V_c^1(\Delta)$:

$$\begin{aligned} 1, I', I'' - \omega &= 45,7 \text{ с}^{-1}; 2, 2', 2'' - \omega = 47,0 \text{ с}^{-1}; 3, 3', 3'' - \omega = 48,0 \text{ с}^{-1}; \\ I'' - V_c(\Delta) &= 19 - 4\Delta + 7 \cdot 10^{-13} \Delta^2; 2'' - V_c(\Delta) = 309 - 393\Delta + 130\Delta^2; \\ 3'' - V_c(\Delta) &= 11 - 4,16\Delta + 3,8\Delta^2. \end{aligned}$$

Конструктивные параметры гравитационного аппарата:

$$r_b = 3,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}; l_b = 4,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}; h_s = (1,5 - 3,0) \cdot 10^{-2} \text{ м}; L_b = 1,85 \cdot 10^{-1} \text{ м}; n_b = 3;$$

$$\rho_{T1} = 1,440 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3; d_{s1} = 4,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}; \mu_0 = 1,3089 \text{ рад}; \mu = 0,7071 \text{ рад};$$

$$L_2 = 2,8 \cdot 10^{-1} \text{ м}; h_2 = 8,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

Физико-механические свойства смешиваемых материалов

$$\rho_{T2} = 1,525 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3; d_{s2} = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}.$$

Согласно рис. 1 (кривая 2), вследствие минимальности значений V_c^1 , предпочтительно длину щеточных элементов l_b и высоту барабанно-лоткового зазора h_0 выбирать так, чтобы их отношение было равно $\Delta = 1,49...1,52$ при значении $\omega = 47 \text{ с}^{-1}$. Второй минимум для коэффициента неоднородности наблюдается при значении $\omega = 45,7 \text{ с}^{-1}$ вблизи $\Delta = 1,6$ (см. рис. 1, кривая 1), однако влияние других режимных параметров из оставшихся в выделенной группе сказывается более явно. Выбор меньших значений комплексного конструктивно-режимного параметра (в частности, $\Delta < 1,45$ (см. рис. 1, кривая 3)) в сравнении со значением из диапазона $\Delta = 1,49...1,52$ приводит к увеличению угловой скорости до значения

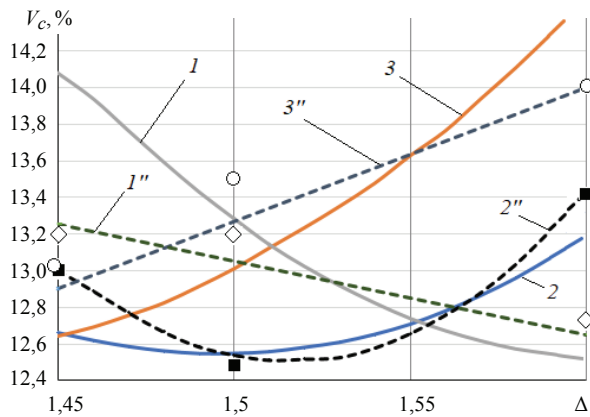


Рис. 1. Зависимость коэффициента неоднородности $V_c(\Delta)$ сыпучей смеси от комплексного конструктивно-режимного параметра Δ для первой стадии смешивания в гравитационном аппарате для манной крупы ГОСТ 7022–97 ($i = 1$) и природного песка ГОСТ 8736–93 ($i = 2$):

1, 2, 3 – теория; 1'', 2'', 3'' – регрессионные зависимости;
 ◊ – 1', ■ – 2', ○ – 3' – экспериментальные данные

$\omega = 48 \text{ с}^{-1}$, что впоследствии отразится на возрастании потребляемой мощности смесительных барабанов.

На рисунке 1 приведены экспериментальные данные (точки 1', 2', 3') и соответствующие им регрессионные зависимости (кривые 1'', 2'', 3''). Относительная погрешность при сопоставлении опытных и расчетных значений: 18 % при $\omega = 45,7 \text{ с}^{-1}$; 8 % при $\omega = 47 \text{ с}^{-1}$; 14 % при $\omega = 48 \text{ с}^{-1}$. Указанное расхождение связано с неучтенным в стохастической модели столкновением частиц в разреженных потоках после отражения от отбойника.

Последующие расчеты производительности гравитационного смесителя на основе предложенных стохастических моделей движения сыпучих компонентов после срыва со щеточных элементов (в момент образования разреженных потоков) [7] и после ударного взаимодействия с наклонной поверхностью [4, 5, 8] подтвердили значимость выделенных параметров ω и Δ [9].

Предложенный подход позволяет выполнить расчет коэффициента неоднородности получаемой смеси для других стадий изучаемого процесса смешивания сыпучих компонентов, необходимых при формировании методики инженерного расчета нового оборудования гравитационного типа.

Список литературы

1. Способы описания движения твердых дисперсных сред в различных плоскостях для сечений смесительного барабана / А. Б. Капанова [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 2. – С. 296 – 304. doi: 10.17277/vestnik.2015.02.pp.296-304
2. Бакин, М. Н. Исследование распределения сыпучих компонентов в рабочем объеме барабанно-ленточного смесителя / М. Н. Бакин, А. Б. Капанова, И. И. Верлока // Фундам. исслед. – 2014. – № 5-5. – С. 928 – 933.
3. The Model of Dispersion of Particles During Their Flow from Chipping the Surface / А. В. Капанова [et al.] // Czasopismo Techniczne. Mechanika. – 2016. – Vol. 113, No. 2. – P. 145 – 150.
4. Капанова, А. Б. Об оценке содержания ключевого компонента после ударного рассеивания сыпучих материалов на начальном этапе порционного смешивания / А. Б. Капанова, И. И. Верлока // Вестн. Ивановского гос. энергет. ун-та. – 2016. – № 3. – С. 78 – 83. doi: 10.17588/2072-2672.2016.3.078-083

5. Stochastic Modeling of Bulk Components Batch Mixing Process in Gravity Apparatus [Электронный ресурс] / I. I. Verloka, A. B. Kapranova, M. Tarshis, S. Cherpitsky // International Journal of Mechanical Engineering & Technology. – 2018. – Vol. 9, Issue 2. – P. 438 – 444. – Режим доступа : http://www.iaeme.com/MasterAdmin/Journal_uploads/IJMET/VOLUME_9_ISSUE_2/IJMET_09_02_045.pdf (дата обращения: 28.12.2018).

6. 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.

7. Капранова, А. Б. Стохастическое описание процесса формирования потоков сыпучих компонентов в аппаратах со щеточными элементами / А. Б. Капранова, И. И. Верлока // Теорет. основы хим. технологии. – 2018. – Т. 52, № 6. – С. 707–721. doi: 10.1134/S0040357118050044

8. Kapranova, A. B. On the Features of Estimating the Coefficient of Inhomogeneity of a Loose Mixture During the Operation of a Gravitational Device / A. B. Kapranova, I. I. Verloka // J. Chem. Eng. Process Technol. – Vol. 9. – P. 53. doi: 10.4172/2157-7048-C3-018

9. Исследование качества смеси на первой стадии работы аппарата гравитационного типа / А. Б. Капранова [и др.] // Российский хим. журн. – 2018. – Т. 62, № 4. – С. 48–50.

On the Influence of a Complex Parameter of the Gravitational Apparatus on the Quality of the Mixture after the First Stage of Mixing

A. B. Kapranova, I. I. Verloka, P. A. Yakovlev, D. D. Bakhaeva

*Department of Theoretical Mechanics and Resistance of Materials,
Yaroslavl State Technical University,
Yaroslavl, Russia; kapranova_anna@mail.ru*

Keywords: gravity mixer; heterogeneity coefficient; chipper; batch blending; bulk materials; distribution functions; brush elements.

Abstract: A method for assessing the quality of the mixture at the first stage of mixing loose components in a gravitational type mixer based on a stochastic model of the process of formation of rarefied flows is proposed. The analysis dependencies obtained for the heterogeneity coefficient of the free-flowing mixture showed a significant influence on the mixing process of a complex structural-mode parameter characterizing the degree of deformation of the brush elements.

References

1. Kapranova A.B., Bakin M.N., Verloka I.I., Zaytsev A.I. [Methods of describing the movement of solid dispersed media in different planes for sections of the mixing drum], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 2, pp. 296-304, doi: 10.17277/vestnik.2015.02.pp.296-304 (In Russ., abstract in Eng.)

2. Bakin M.N., Kapranova A.B., Verloka I.I. [Investigation of the distribution of bulk components in the working volume of the drum-ribbon mixer], *Fundamentalnye issledovaniya* [Fundamental research], 2014, no. 5-5, pp. 928-933. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Kapranova A.B., Verloka I.I., Lebedev A.E., Zaitzev A.I. The Model of Dispersion of Particles During Their Flow from Chipping the Surface, *Czasopismo techniczne. Mechanika*, 2016, vol. 113, no. 2, pp. 145-150.

4. Kapranova A.B., Verloka I.I. [On assessing the content of a key component aftershock dispersion of bulk materials at the initial stage of batch mixing], *Vestnik*

Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta [Ivanovo State Power Engineering University Bulletin], 2016, no. 3, pp. 78-83, doi: 10.17588/2072-2672.2016.3.078-083 (In Russ.)

5. http://www.iaeme.com/MasterAdmin/Journal_uploads/IJMET/VOLUME_9_IS_SUE_2/IJMET_09_02_045.pdf (accessed 28 December 2018).

6. Kapranova A.B., Bakin M.N., Verloka I.I. [Modeling the quality criterion of the mixture in the volume of a bar-bath-tape device], *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and oil and gas engineering], 2018, no. 5, pp. 3-9. (In Russ.)

7. Kapranova A.B., Verloka I.I. [A stochastic description of the process of forming streams of loose components in devices with brush elements], *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical foundations of chemical technology], 2018, vol. 52, no. 6, pp. 707-721, doi: 10.1134/S0040357118050044 (In Russ.)

8. Kapranova A.B., Verloka I.I. On the Features of Estimating the Coefficient of Inhomogeneity of a Loose Mixture During the Operation of a Gravitational Device, *J. Chem. Eng. Process Technol.*, vol. 9, pp. 53, doi: 10.4172/2157-7048-C3-018

9. Kapranova A.B., Verloka I.I., Yakovlev P.A., Bakhayeva D.D. [The study of the quality of the mixture in the first stage of the operation of a gravitational-type apparatus], *Rossiyskiy khimicheskii zhurnal* [Russian Chemical Journal], 2018, vol. 62, no. 4, pp. 48-50. (In Russ., abstract in Eng.)

Über den Einfluss des komplexen Parameters des Gravitationsgeräts auf die Qualität der Mischung nach der ersten Mischstufe

Zusammenfassung: Es ist ein Verfahren zur Bewertung der Qualität der Mischung in der ersten Stufe des Mischens von Schüttgutkomponenten in einem Gravitationsstyp-Mischer vorgeschlagen, das auf einem stochastischen Modell des Prozesses der Bildung der verdünnten Ströme basiert. Die Analyse der erhaltenen Abhängigkeiten für den Heterogenitätskoeffizienten der Schüttmischung zeigte einen wesentlichen Einfluss auf den Mischvorgang eines komplexen konstruktiven Betriebsparameters, der den Verformungsgrad der Bürstenelemente kennzeichnet.

Sur l'influence du paramètre complexe de l'appareil de gravité sur la qualité du mélange après la première étape du mélange

Résumé: Est proposée une méthode d'évaluation de la qualité du mélange à la première étape du mélange des composants en vrac dans un mélangeur du type gravitationnel sur le modèle stochastique du processus de la formation de flux épars. L'analyse les contraintes résultant pour le coefficient d'hétérogénéité du mélange en vrac a montré un impact significatif sur le processus de mélange d'un paramètre complexe qui caractérise le degré de déformation des éléments de brosse.

Авторы: *Капранова Анна Борисовна* – доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой теоретической механики и сопротивления материалов; *Верлока Иван Игоревич* – аспирант кафедры теоретической механики и сопротивления материалов; *Яковлев Павел Андреевич* – магистрант; *Бахаева Дарья Дмитриевна* – магистрант, ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», г. Ярославль, Россия.

Рецензент: *Першин Владимир Федорович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Техника и технологии производства нанопроductов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.