

Экспериментальные исследования процесса смешивания сыпучих зерновых материалов*

Н. В. Гучева

Представлены результаты экспериментальных исследований качества смеси в вибрационном смесителе с профильным дном в зависимости от времени процесса, геометрии дна смесителя и параметров вибрации (амплитуды и частоты колебаний). Предложена методика непрерывного определения качества смеси во времени при исследовании процесса вибрационного смешивания модельного материала на экспериментальной установке с использованием видеосъёмки и последующей обработкой отснятого материала. Определены границы применимости предложенного способа исследования процесса вибрационного смешивания. В качестве критерия оценки качества смеси принят коэффициент неоднородности. Особое внимание в статье уделено статистической обработке экспериментальных данных. Результаты экспериментов визуализированы и представлены в виде математической зависимости изменения коэффициента неоднородности смеси от времени процесса. Подтверждены экспериментально теоретические решения о зависимости качества смеси от времени смешивания.

Ключевые слова: *вибрационный смеситель, сыпучий материал, качество смеси.*

Введение. Основной задачей процесса смешивания сыпучих зерновых материалов является получение однородных смесей, в которых частицы каждого компонента равномерно распределены во всём объёме благодаря взаимному перемещению их под воздействием внешних сил. Применяются они, например, при производстве комбикормов, продуктов питания, строительных смесей и т. д. При традиционных способах оценки качества смешивания материалов (весовой, рассев на ситах, оптический) коэффициент неоднородности смеси определяется после завершения процесса смешивания [1, 2]. Эти способы оценки качества смешивания материалов достаточно трудоёмки и требуют значительных затрат времени на проведение анализа качества. В последнее время предложены новые способы оценки качества смеси. В работах [3–5] используется способ определения коэффициента неоднородности смеси сыпучих материалов, различающихся по цвету. При нахождении концентрации ключевого компонента содержание пробы сначала распределяют равномерным слоем на ровной поверхности, затем фотографируют или сканируют. После этого проводят компьютерную обработку изображения, представляют его в виде массива чисел, каждый элемент которого выражен пикселем, значение которого соответствует цвету компонента. Далее выбирают диапазон значений пикселей и присваивают все пиксели, находящиеся в этом диапазоне, ключевому компоненту, а другому — все остальные пиксели; производят подсчёт пикселей, соответствующих каждому компоненту, и определяют концентрацию ключевого компонента, по которой вычисляют коэффициент неоднородности смеси. И при этом способе качество смеси определяется после завершения процесса смешивания. В связи с этим большой интерес представляет способ непрерывного определения коэффициента неоднородности смеси во времени без отбора проб традиционным способом и без остановки процесса смешивания, что позволит выявить новые возможности управления однородностью смеси.

Решение задачи о непрерывном определении качества смеси является актуальной, поскольку позволяет выявлять возможности для совершенствования конструкции вибрационных смесителей.

Экспериментальная установка и выбор модельного материала. Исследование процесса вибрационного смешивания зерновых материалов проводилось на экспериментальной установке

* Работы выполнены в рамках инициативной НИР.

(рис. 1), представляющей собой сосуд с профильным дном [6]. Сосуд, изготовленный из гетинакса, толщиной 30 мм состоял из двух частей: верхняя часть (крышка) имела постоянный сферический профиль, нижняя часть (дно) имело сменный (сферический, параболический, V-образный) профиль. Стенки сосуда выполнялись плоскопараллельными прозрачными с нанесённой координатной сеткой размером 7×7 мм. Сосуд жёстко закреплялся на платформе. Платформа с сосудом приводилась в колебательное движение электродвигателем постоянного тока посредством кривошипно-шатунного механизма. Частота колебаний находилась в пределах от 66,6 до 142 с⁻¹, амплитуда колебаний составляла 0,0018; 0,0025; 0,0035; 0,005 м.

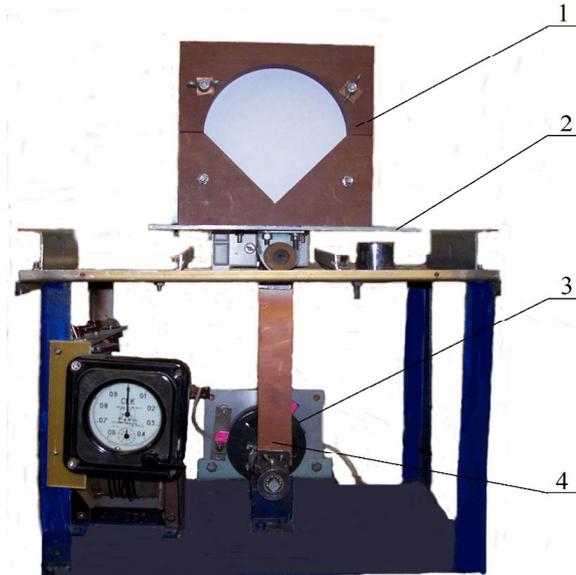


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 — сосуд с профильным дном, 2 — платформа, 3 — электродвигатель, 4 — кривошипно-шатунный механизм

В качестве модельного материала использовалось шлифованное пшено эллипсоидной формы с размерами осей 2,5×2,0×1,6 мм. Исследовалась двухкомпонентная смесь. В качестве ключевого компонента использовалось меченое пшено в соотношении 1:13. Меченое пшено получали путём окрашивания шлифованного пшена той же партии водным раствором краски чёрного цвета без образования слоя краски на поверхности зерна благодаря тому, что пигмент проникал в микропоры зерна, изменяя его цвет. Коэффициент трения меченого пшена определялся по той же методике, что и неокрашенного. Значения коэффициентов трения по гетинаксу обычного и меченого пшена при влажности около 12 % оказались равными и составили: из состояния покоя — 0,439, в движении — 0,384.

Такой выбор модельного материала исключил влияние на процесс смешивания множества факторов, зависящих от физико-механических свойств смешиваемых компонентов.

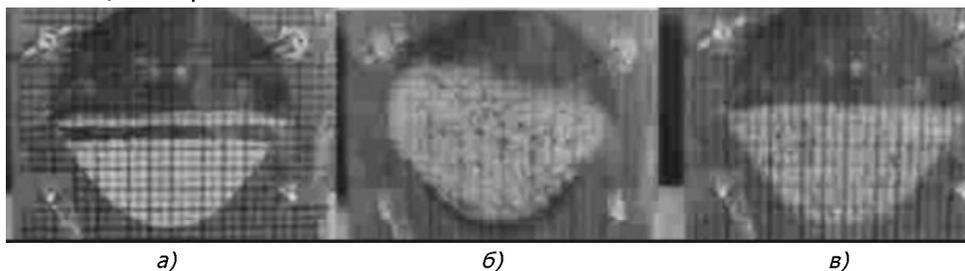


Рис. 2. Кадры видеофильма процесса смешивания двухкомпонентной смеси в сосуде с параболическим дном: а — исходное состояние; б — промежуточное состояние; в — состояние в конце процесса смешивания

На рис. 2 изображён процесс смешивания двухкомпонентной смеси в сосуде с параболическим дном.

Методика непрерывного определения качества смеси. Для исследования процесса смешивания двухкомпонентной смеси в сосуде с профильным дном видеокамеру фокусировали на анализируемый материал и осуществляли съёмку со скоростью около 16 кадров в секунду. В результате обработки отснятого материала с помощью Windows Movie Maker и VirtualDub для каждого кадра видеофильма подсчитывалось количество ключевого компонента в квадратах сетки 14×14 мм. Сделано допущение, что каждый квадрат сетки есть проба, взятая из смеси. Качество смеси оценивалось статистическим методом по среднему квадратичному отклонению содержания ключевого компонента в квадратах сетки.

Обоснование ограничений времени наблюдений. В начальный момент смешивания для сосуда толщиной 30 мм с параболическим дном на кадре изображено 1472 зёрна, в том числе 185 зёрен ключевого компонента (рис. 2, а). Примем допущение, что сосуд имеет толщину равную толщине одного зерна пшена. Тогда на изображении кадров процесса смешивания можно было бы увидеть 185 рассеянных зёрен ключевого компонента. На самом деле этого не происходит, поскольку в начальный момент процесса зёрна, находящиеся у стенки сосуда, в результате взаимодействия между собой перемещаются как в глубину сосуда, так и в обратном направлении. В связи с этим количество зёрен ключевого компонента у стенки сосуда в начальные моменты процесса смешивания не равно 185. После 25 секунд от начала вибрационного смешивания процесс перемещения зёрен от стенки в глубину сосуда и в обратном направлении уравнивается, а число зёрен ключевого компонента у стенки приближается к 185. Это позволяет оценить качество смеси во времени, применив метод статистического анализа. Из этих наблюдений состояния смеси сделано предположение, что по толщине сосуда смесь однородна. Распределение изменения количества зёрен у стенки сосуда статистической обработкой определено как равномерное, что косвенно может служить доказательством однородности смеси и по толщине сосуда. Таким образом, после 25 с процесса вибрационного смешивания изображение распределения зёрен ключевого компонента представляет реальное состояние смеси в сосуде.

На рис. 3 представлена диаграмма разницы между ожидаемым и наблюдаемым количеством зёрен ключевого компонента у стенки сосуда от времени смешивания.

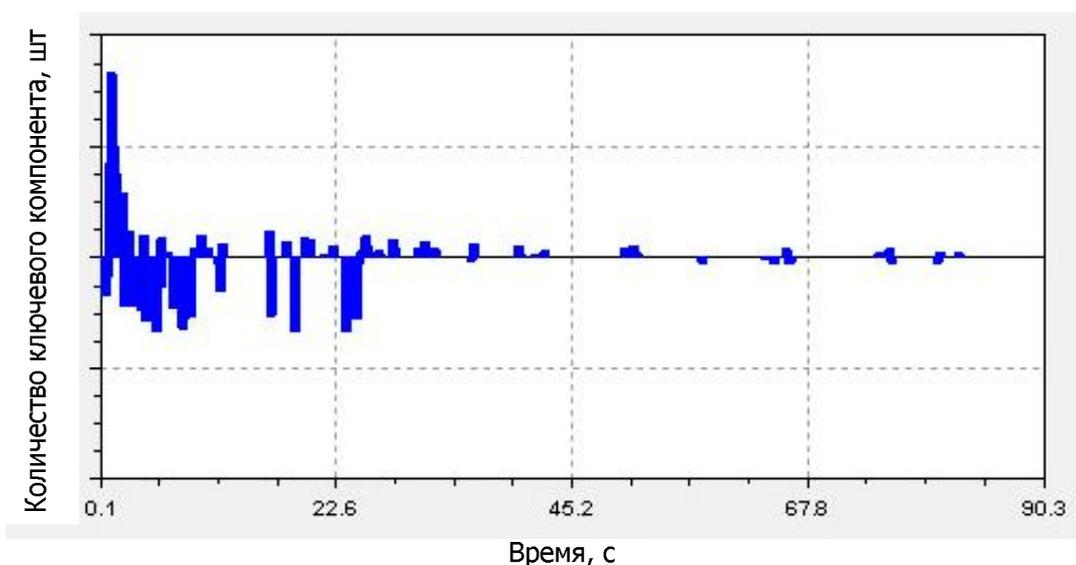


Рис. 3. Разница между ожидаемым и наблюдаемым количеством зёрен ключевого компонента в зависимости от времени смешивания

Критерий оценки качества смеси. В качестве критерия оценки качества смеси принят коэффициент неоднородности V_c [1]:

$$V_c = \frac{100}{\bar{c}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{c}_i - \bar{c})^2}{n-1}}, \quad (1)$$

где \bar{c} — среднее арифметическое значение концентрации ключевого компонента в пробах в %; \bar{c}_i — значение концентрации ключевого компонента в i -й пробе; n — число проанализированных проб.

Поскольку в пробе всегда одно и то же количество зёрен — 49, то концентрация \bar{c}_i равна количеству зёрен ключевого компонента в пробе.

В табл. 1 приведён пример экспериментального определения параметров выражения (1) для кадра № 298 видеосъёмки процесса смешивания в сосуде с параболическим дном.

Таблица 1

Экспериментальное определение качества смеси на примере кадра № 298

№ 298	42,56 с							
	4	3	5	3	5	4	5	3
	5	4	3	5	4	5	5	4
	6	4	6	5	1	3	2	2
	3	5	4	3	3	4	4	5
		4	4	5	4	4	5	5
		4	4	4	5	5		
Среднее арифметическое значение				4,09			Всего зёрен	180
Среднее квадратичное отклонение				1,05				
Число наблюдений				44				
Для 42,56 с от начала процесса								

Для кадра № 298 коэффициент неоднородность смеси составил 25,7 %.

Результаты экспериментального определения качества смеси. В работе [7] теоретически показано, что качество смеси от времени процесса при вибрационном смешивании описывается экспоненциальной зависимостью. Статистическая обработка экспериментальных данных направлялась на выявление эмпирической зависимости качества смеси от времени процесса и на сравнение этой зависимости с теоретической.

На рис. 4 показано изменение качества смеси от времени смешивания на временном участке смешивания от 25 с до 127 с для сосуда с параболическим дном. Данные получены при частоте вибрационного воздействия $\omega = 121,5 \text{ с}^{-1}$ и амплитуде $A = 0,0025 \text{ м}$.

Эмпирическое уравнение коэффициента неоднородности смеси от времени смешивания имеет вид

$$V = 42,5 \exp(-0,026t) \% \quad (2)$$

Коэффициент корреляции коэффициента неоднородности смеси между экспериментальными значениями и вычисленными по уравнению (2) составил $r = 0,78$.

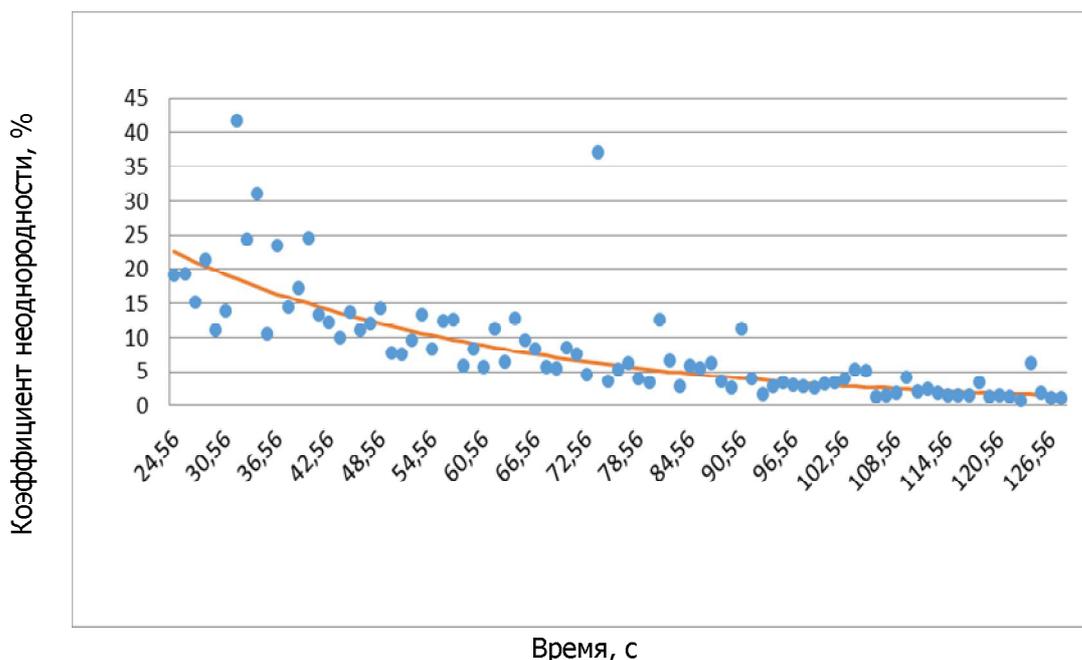


Рис. 4. Изменение однородности смеси от времени смешивания для сосуда с параболическим дном

Заключение. Предложена методика непрерывного определения качества смеси во времени при исследовании процесса вибрационного смешивания на экспериментальной установке с использованием видеосъёмки и с последующей обработкой отснятого материала.

Экспериментально подтверждены теоретические решения о характере изменения качества смеси во времени при вибрационном воздействии на сыпучий зерновой материал в сосуде с профильным дном.

Библиографический список

1. Макаров, Ю. И. Аппараты для смешения сыпучих материалов / Ю. И. Макаров. — Москва : Машиностроение, 1973. — 216 с.
2. Комбикорма. Ч. 4 : Корма. Комбикорма. Комбикормовое сырьё. Методы анализа : ГОСТ 13496.0–80 / М-во заготовок СССР. — Москва : Изд-во стандартов, 2002. — 160 с.
3. Критерии и способы оценки качества смешивания сыпучих материалов / В. В. Воронин [и др.] // Электрон. науч. журн. «Инженер. вестн. Дона». — Режим доступа : <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1400> (дата обращения : 09.09.2013).
4. Способ определения коэффициента неоднородности сыпучих материалов : пат. 2371698 Рос. Федерация : МПК G01N1/28 / А. Е. Лебедев, А. И. Зайцев, А. Б. Капранова, А. А. Павлов, А. В. Сугак. — № 2008101209/12; заявл. 09.01.08; опубл. 27.10.09; Бюл. № 30. — 4 с.
5. Способ определения качества смеси компонентов, различающихся по цвету : пат. 2385454 Рос. Федерация : МПК G01N1/38, B01F3/18. / М. Ю. Таршис, Л. В. Королёв, А. И. Зайцев. — № 2008144214/12; заявл. 06.11.08; опубл. 27.03.10; Бюл. № 9. — 5 с.
6. Ильченко, В. Д. Результаты экспериментов по смешиванию сыпучих материалов в вибрационном смесителе / В. Д. Ильченко, Н. В. Гучева // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2010. — Т. 10, № 7 (50). — С. 1067–1071.
7. Гучева, Н. В. Исследование вибрационного смешивания сыпучих зернистых материалов / Н. В. Гучева // Вестн. Дон. гос. техн. ун-та. — 2009. — Т. 9, спецвып., ч. 1. — С. 151–163.

Материал поступил в редакцию 14.10.2013.

References

1. Makarov, Y. I. Apparaty dlia smesheniya sypuchih materialov. [Apparatus for mixing bulk materials.] Moscow : Mashinostroyeniye, 1973, 216 p. (in Russian).
2. Kombikorma. Ch. 4: Korma. Kombikorma. Kombikormovoye syrye. Metody analiza: GOST 13496.0-80 [Mixed feeds. Part 4: Feeds. Mixed feeds. Feed raw materials. Analysis methods: State standard 13496.0-80]. USSR Feedstock Ministry. Moscow: Izdatelstvo standartov, 2002, 160 p. (in Russian).
3. Voronin, V. V., Adigamov, K. A., Petrenko, S. S., Sizyakin, R. A. Kriterii i sposoby otsenki kachestva smeshivaniya sypuchikh materialov. [Criteria and methods for evaluating the quality of mixing loose materials.] Elektronnyy nauchnyy zhurnal Inzhenernyy vestnik Dona. Available at: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1400> (accessed: 09.09.2013) (in Russian).
4. Lebedev, A. E., Zaitsev, A. I., Kapranova, A. B., Pavlov, A. A., Sugak, A. V. Sposob opredeleniya koeffitsienta neodnorodnosti sypuchikh materialov. [Method of determining the heterogeneity coefficient of loose materials.] Patent RF, no. 2371698, 2008 (in Russian).
5. Tarshis, M. U., Korolev, L. V., Zaitsev, A. I. Sposob opredeleniya kachestva smesi komponentov razlichaiushchikhsia po tsvetu. [Method of determining quality of heterochromatic component mixture.] Patent RF, no. 2385454, 2008 (in Russian).
6. Ilchenko, V. D., Gucheva N. V. Rezultaty eksperimentov po smeshivaniyu sypuchikh materialov v vibratsionnom smesite. [Experimental results on mixing granular materials in vibration mixer.] Vestnik of DSTU, 2010, vol. 10, no. 7 (50), pp. 1067–1071 (in Russian).
7. Gucheva, N. V. Issledovaniye vibratsionnogo smeshivaniya sypuchikh zernistyykh materialov. [Research of vibration mixing of loose granular materials.] Vestnik of DSTU, 2009, vol. 9, pp. 151–163 (in Russian).

EXPERIMENTAL RESEARCH OF MIXING LOOSE GRANULAR MATERIALS*

N. V. Gucheva

The experimental research results of the mixture quality in the vibration mixer with a profile bottom depending on the process life, mixer bottom geometry, and vibration parameters (amplitude and frequency of fluctuations) are presented. The technique for continuous determining the mixture quality in time is offered for investigating the process of vibratory mixing model material at the pilot unit using the video shooting, and with the footage post-processing. The applicability domain of the offered research method of the vibration mixing process is defined. The heterogeneity coefficient is accepted as a criterion of the mixture quality assessment. Particular attention is paid to the statistical analysis of the experimental data. The experiment results are visualized and presented in the form of the mathematical relation of the mixture heterogeneity coefficient and the process life. The theoretical solutions about the dependence of the mixture quality on the mixing time are confirmed experimentally.

Keywords: vibration mixer, loose material, mixture quality.

* The research is done within the frame of the independent R&D.