УДК 519.6
DOI: 10.17277/vestnik.2026.03.pp.472-478

ИССЛЕДОВАНИЕ БАРАБАННО-ЛОПАСТНОГО СМЕСИТЕЛЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ И ВЫБОР ЕГО ПАРАМЕТРОВ

© Л. И. Филинков[1], М. Ю. Таршис[1], Л. В. Королев[2], А. Б. Капранова[1] ✉

[1] *Кафедра «Теоретическая и прикладная механика»; mutarshis@yahoo.com;*
[2] *кафедра «Информационные системы и технологии»,*
ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет»,
Ярославль, Российская Федерация

Ключевые слова: барабанно-лопастной смеситель; коэффициент неоднородности; параметры; процесс смешивания; расчет; сыпучие материалы.

Аннотация: Проведены исследования влияния параметров барабанно-лопастного смесителя на качество получаемой смеси. Изучено влияние шага установки лопастей вдоль оси аппарата, радиуса их установки и угла наклона лопасти к плоскости поперечного сечения корпуса смесителя на однородность смеси. Результаты исследований представлены в виде кривых смешивания. Представлена постановка задачи оптимизации параметров смесителя.

Введение

Среди смесителей сыпучих материалов самое широкое применение в различных отраслях промышленного производства находят аппараты барабанного типа, которые распространены в химической промышленности, металлургии, строительном производстве, угольной промышленности, энергетике, производстве керамических изделий, медикаментов и целом ряде других. Это связано с тем, что такие аппараты отличаются низкой энергоемкостью, в силу тихоходности привода, а также сравнительно низкой металлоемкостью и простотой конструкции. Тем не менее получение однородных сыпучих смесей компонентов, частицы которых отличаются по своим физико-механическим свойствам (диаметрам частиц, их плотности, форме и др.) достаточно затруднено из-за процессов сегрегации, сопровождающих основной процесс [1]. Сегрегация смеси в аппаратах барабанного типа связана с тем, что движущиеся частицы меньшего диаметра и (или) большей плотности сосредоточиваются в центре циркуляции смеси, а остальные, в виде эллиптических колец, располагаются на периферии поперечного сечения смеси. Значительного снижения сегрегации можно достичь путем установки дополнительных рабочих органов (лопастей), проходящих через центр сегрегации при работе устройства [1]. За последние годы был разработан и предложен к использованию в производстве ряд новых конструкций таких устройств [2 – 4].

Цель работы – исследование влияния параметров конструкции аппарата барабанно-лопастного типа на качество получаемой смеси и выработка рекомендаций по рациональному проектированию такого устройства.

Описание смесителя и методики проведения эксперимента

На рисунке 1 показана установка для исследования барабанно-лопастного аппарата. Она содержит цилиндрический корпус *1*, внутри которого размещены ступени с рабочими лопастями *2*. Корпус имеет торцевые стенки *3* и *4*. Внутри корпуса *1*, на расстоянии L_p от среза лопасти, могут устанавливаться прозрачные кольцевые перегородки *5*. Загрузка компонентов происходит из бункера *6*, выгрузка – в приемный бункер *7* через патрубок *8*. Привод смесителя (не показан) соединен с опорными валками *9*. Смешиваемые компоненты, находящиеся внутри корпуса *1*, движутся в режиме переката, то есть происходит их подъем и обрушение. Перемешивание компонентов происходит преимущественно в потоке обрушения материала, а также при перетасовке смеси лопастями *2*.

Исследуемые конструктивные параметры смесителя:

$$\left\{L, L_p, \alpha_1, \alpha_2, d_в, D\right\},$$

где L – длина корпуса *1*; L_p – расстояние от среза лопасти до перегородки *5*; α_1, α_2 – углы наклона лопастей к плоскости поперечного сечения рабочей камеры; $d_в = 0{,}23$ м – внутренний диаметр рабочей камеры; $D = 0{,}242$ м. Диапазоны изменения этих параметров: $L = [0{,}01 – 0{,}405]$ м; $L_p = [0{,}01 – 0{,}09]$ м; $\alpha_1 = [8° – 120°]$, $\alpha_2 = [8° – 120°]$.

В качестве критерия оценки однородности сыпучей смеси (выходного параметра) принят коэффициент неоднородности [1]. При исследованиях коэффициент неоднородности смеси определялся бесконтактным методом, после фиксации ее изображения через прозрачную перегородку *5* с последующим его анализом [5, 6]. Для этого последовательно снимаются кольцевые перегородки *5*, и удаляется смесь, находящаяся перед следующей перегородкой. Затем проводился ее анализ по методике [6]. Обработка результатов эксперимента осуществлялась методом наименьших квадратов с последующим поиском уравнения приближенной регрессии, связывающего коэффициент неоднородности смеси с параметрами смесителя. Для оценки качества аппроксимации, как и в работе [6], использован коэффициент детерминации R^2.

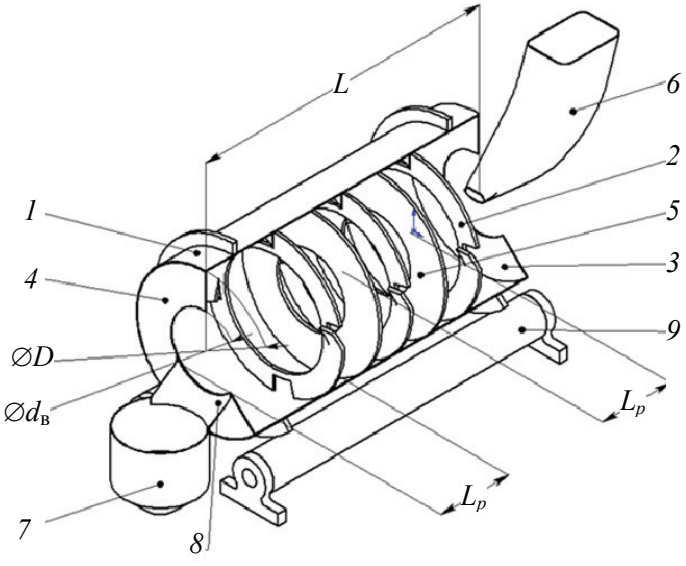


Рис. 1. Схема экспериментальной установки барабанно-лопастного смесителя

Значения коэффициента неоднородности в сечении (слое) на расстоянии L получали по формуле

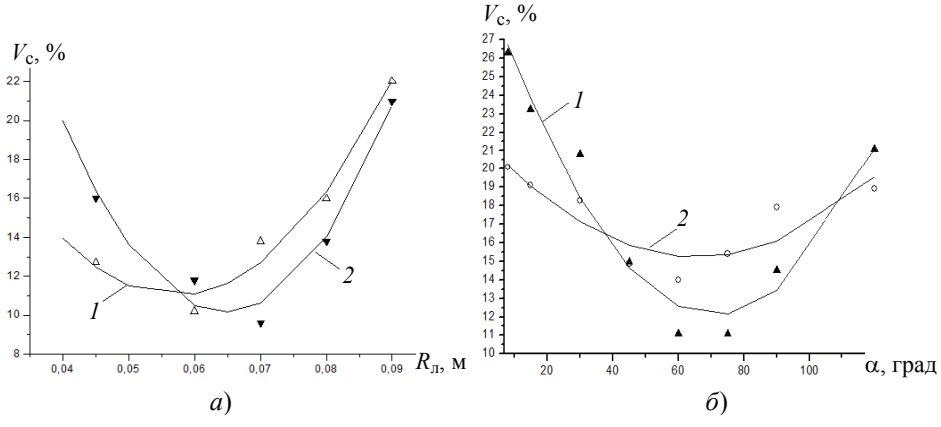
$$V_{CL}^{p} = \frac{1}{\bar{c}_L^{p}} \sqrt{\frac{1}{v_{\text{об}}} \sum_{i=1}^{n} v_i \left(c_{iL}^{p} - \bar{c}_L^{p}\right)^2}, \qquad (1)$$

где $\bar{c}_L^{p} = \dfrac{v^{\text{кл}}}{v_{\text{об}}}$ – средняя по объему концентрация ключевого компонента в поперечном слое сыпучего материала толщиной, равной диаметру наибольшей частицы, $v^{\text{кл}}$ – объем частиц ключевого компонента во всем слое, $v_{\text{об}}$ – объем частиц в слое; $c_{iL}^{p} = \dfrac{v_i^{\text{кл}}}{v_i}$ – концентрация ключевого компонента в i-й пробе – области слоя, $v_i^{\text{кл}}$ – объем частиц ключевого компонента в пробе – области слоя, v_i – объем частиц в пробе – области слоя.

Результаты исследований

Влияние основных конструктивных параметров смесителя на коэффициент неоднородности получаемой смеси $V_{\text{с}}$, отражают зависимости, представленные на рис. 2 и 3. Кривые смешивания построены в результате аппроксимации экспериментальных точек.

Результаты исследований показывают экстремальное влияние радиуса $R_{\text{л}}$ установки лопасти на качество получаемой смеси $V_{\text{с}}$ (см. рис. 2, *а*). Очевидно, это связано с падением однородности смеси при смещении лопасти относительно центра сегрегации сыпучей смеси.



а) *б*)

Рис. 2 Зависимости коэффициента неоднородности смеси (символы – эксперимент, линии – аппроксимация):

а – от радиуса $R_{\text{л}}$ установки лопасти различной высоты при различных значениях концентрации смеси *с* ключевого компонента и соотношении средних диаметров частиц $d_1/d_2 = 0{,}57$: *1* – $c = 0{,}5$; $h = 0{,}03$ м; $V_{\text{с}} = 43{,}9 - 1152{,}9R_{\text{л}} + 10107\,R_{\text{л}}^2$; $R^2 = 0{,}973$; *2* – $c = 0{,}33$; $h = 0{,}02$ м; $V_{\text{с}} = 78{,}03 - 2103R_{\text{л}} + 16290R_{\text{л}}^2$; $R^2 = 0{,}960$;

б – от углов наклона лопасти к плоскости поперечного сечения при различных значениях концентрации ключевого компонента (рапс – просо, $\alpha = \alpha_1 = \alpha_2$): *1* – $c = 0{,}2$; $V_{\text{с}} = 21{,}65 - 0{,}195\alpha + 0{,}00148\alpha^2$; *2* – $c = 0{,}8$; $V_{\text{с}} = 30{,}96 - 0{,}531\alpha + 0{,}00374\alpha^2$

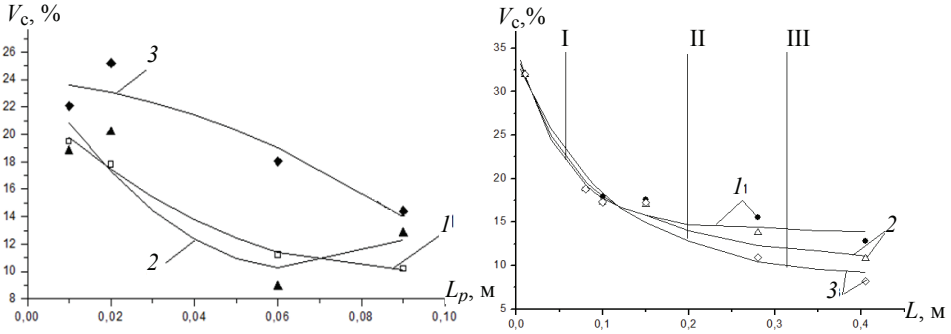
Исследования коэффициента неоднородности смеси V_c устанавливают также экстремальное влияние на него углов наклона перемешивающих лопастей при различных значениях концентрации ключевого компонента (см. рис. 2, *б*.). Очевидно, что при углах α, лежащих вне определенного диапазона, снижается площадь перекрытия и соответственно «захват» «ядра сегрегации».

На рисунке 3, *а* показаны результаты исследований, отражающие поведение коэффициента неоднородности смеси за срезом лопасти на длине L_p. Последствия воздействия лопасти проявляются в росте однородности смеси на участке $L_p = [0{,}06 – 0{,}09]$ м, что связано с ростом эффективности диффузионного смешивания после конвективного воздействия лопастей. Полученный результат (кривая смешивания) имеет значение с точки зрения выбора рациональных размеров смесителя (расстояний между перемешивающими ступенями). Значение параметра L_p определяет шаг установки ступеней с лопастями по длине корпуса смесителя и, следовательно, габариты и металлоемкость аппарата.

На рисунке 3, *б* показаны кривые, отражающие изменение качества смеси в зависимости от расстояния сечения от места загрузки компонентов, то есть от длины смесителя L. Из графика видно, что сначала происходит существенный рост однородности смеси с увеличением длины L корпуса смесителя с последующей стабилизацией коэффициента неоднородности на участке $L = [0{,}15 – 0{,}405]$ м.

Результаты экспериментальных исследований, представленные на рис. 2, *а*, *б* и 3, *а*, в виде кривых смешивания, которые имеют экстремум коэффициента неоднородности V_c, создают предпосылки для постановки задачи оптимизации конструкции смесителя.

Для решения такой задачи необходимо выбрать критерий оптимизации, который должен быть записан в виде целевой функции параметров смесителя.



а) *б*)

Рис. 3. Зависимости коэффициента неоднородности смеси (символы – эксперимент, линии – аппроксимация):

а – от расстояния L_p от среза лопасти до исследуемого сечения корпуса смесителя при различных значениях концентрации ключевого компонента:
1 – $c = 0{,}1$; $V_c = 22{,}38 – 278{,}6L_p + 1584{,}6\,(L_p)^2$; *2* – $c = 0{,}33$; $V_c = 25{,}03 – 455{,}6L_p + 3493{,}2\,(L_p)^2$; *3* – $c = 0{,}5$; $V_c = 23{,}95 – 25{,}9L_p – 935{,}1(L_p)^2$

б – от расстояния L от места загрузки при различных конструкциях лопастей 2 и 3 ступеней трехступенчатого смесителя (рапс – просо);
I, II, III – места установки лопастных ступеней; угол наклона лопастей к плоскости поперечного сечения корпуса $\alpha_1 = 60°$, $\alpha_2 = 30°$; ширина b и высота h лопастей:
1 – $b = 60$, $h = 60$ (все ступени); *2* – $b = 60$, $h = 60$ (1 и 2 ступени); $b = 60$, $h = 20$ (3 ступень); *3* – $b = 60$, $h = 60$ (1 ступень); $b = 60$, $h = 20$ (2 и 3 ступени)

В качестве такой функции представляется удачным выбор коэффициента неоднородности $V_{\text{с}}$

$$V_{\text{с}} = V_{\text{с}}\left(\alpha, R_{\text{л}}, L_p, ...\right). \quad (2)$$

Задача оптимизации в этом случае будет состоять в определении параметров

$$\left(\alpha, R_{\text{л}}, L_p, ...\right), \quad (3)$$

при которых функция (2) достигает минимума

$$V_{\text{с}} = V_{\text{с}}\left(\alpha, R_{\text{л}}, L_p, ...\right) \rightarrow \min .$$

В качестве ограничений могут быть приняты условия, определяющие диапазоны допустимых размеров смесителя, например $L \le [L]$. Решение такой задачи с учетом взаимной зависимости параметров (3) является достаточно сложным. Однако в ряде случаев в уравнении (2) число параметров может быть уменьшено.

Выбор критерия оптимальности может меняться в соответствии с требованиями технического задания. В качестве целевой функции может быть принята масса аппарата или один из его габаритных размеров, например, длина корпуса смесителя $L = L\left(\alpha, R_{\text{л}}, L_p, ...\right)$, а в качестве ограничения – значение коэффициента неоднородности $V_{\text{с}}$ смеси $V_{\text{с}} \le [V_{\text{с}}]$.

Заключение

Результаты исследования барабанно-лопастного смесителя, полученные в виде кривых смешивания, устанавливают экстремальное влияние основных параметров его конструкции на коэффициент неоднородности получаемой сыпучей смеси. Поэтому для рационального выбора этих параметров при проектировании необходимо решение оптимальной задачи. При постановке этой задачи целевая функция, содержащая параметры проектируемого смесителя, должна быть сформирована либо в виде критерия однородности смеси, либо массы (или габаритных размеров) аппарата, в зависимости от условий технического задания.

Список литературы

1. Макаров, Ю. И. Аппараты для смешения сыпучих материалов / Ю. И. Макаров. – Москва : Машиностроение, 1973. – 216 с.

2. Патент № 2626203 Российская Федерация, МПК B01F 9/02 (2006.01), B01F 3/18 (2006.01). Смеситель : № 2016126747 : заявл. 04.07.2016 : опубл. 24.07.2017 / Таршис М. Ю., Черпицкий С. Н., Королев Л. В., Зайцев А. И. ; заявитель и патентообладатель : ФГБОУ ВО «ЯГТУ». – Бюл. № 21. – 6 с.

3. Патент № 2812190 Российская Федерация, МПК B01F 27/2123 (2022.01). Смеситель сыпучих материалов : № 2023114105 : заявл. 29.05.2023 : опубл. 24.01.2024 / Таршис М. Ю., Смирнов П. М., Королев Л. В., Капранова А. Б. ; заявитель и патентообладатель : ФГБОУ ВО «ЯГТУ». – Бюл. № 3. – 9 с.

4. Патент № 2848783 Российская Федерация, МПК B01F 29/62 (2022.01), B01F 31/55 (2022.01). Смеситель сыпучих материалов : № 2025118936 : заявл. 09.07.2025 : опубл. 21.10.2025 / Таршис М. Ю., Филинков Л. И., Королев Л. В., Капранова А. Б. ; заявитель и патентообладатель : ФГБОУ ВО «ЯГТУ». – Бюл. № 30. – 8 с.

5. Патент № 2690539 Российская Федерация, МПКВ01F 3/18 (2006.01), G01N 21/00 (2006.01), G01N 1/38 (2006.01). Способ исследования качества смеси компонентов, различающихся по цвету : № 2018124151 : заявл. 02.07.2019 : опубл. 04.06.2019 / Таршис М. Ю., Черпицкий С. Н., Королев Л. В., Капранова А. Б. ; заявитель и патентообладатель : ФГБОУ ВО «ЯГТУ». – Бюл. № 16. – 9 с.

6. Таршис, М. Ю. Исследование качества сыпучей смеси. Моделирование. Критерии. Эксперимент : монография / М. Ю. Таршис, Л. В. Королев, А. И. Зайцев. – Ярославль : Изд-во ЯГТУ, 2015. – 116 с.

Investigation of a Drum-and-Blade Mixer for Bulk Materials and Selection of Its Parameters

© L. I. Filinkov[1], M. Yu. Tarshis[1], L. V. Korolev[2], A. B. Kapranova[1]

[1] *Department of Theoretical and Applied Mechanics; mutarshis@yahoo.com;*
[2] *Department of Information Systems and Technologies,*
Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation

Keywords: drum-and-blade mixer; non-uniformity coefficient; parameters; mixing process; calculation; bulk materials.

Abstract: A study on the influence of drum-and-blade mixer parameters on the quality of the resulting mixture was conducted. The effects of blade spacing along the apparatus axis, blade installation radius, and the angle of blade inclination relative to the mixer casing's cross-sectional plane on mixture homogeneity were investigated. The research results are presented as mixing curves. A formulation of the problem regarding the optimization of mixer parameters is also presented.

References

1. Makarov Yu.I. *Apparaty dlya smesheniya sypuchikh materialov* [Apparatus for mixing bulk materials], Moscow: Mashinostroyeniye, 1973, 216 p. (In Russ.)

2. Tarshis M.Yu., Cherpitskiy S.N., Korolev L.V., Zaytsev A.I. *Smesitel'* [Mixer], Russian Federation, 2017, Pat. 2626203 (In Russ.)

3. Tarshis M.Yu., Smirnov P.M., Korolev L.V., Kapranova A.B. *Smesitel' sypuchikh materialov* [Bulk Material Mixer], Russian Federation, 2024, Pat. 2812190 (In Russ.)

4. Tarshis M.Yu., Filinkov L.I., Korolev L.V., Kapranova A.B. *Smesitel' sypuchikh materialov* [Bulk Material Mixer], Russian Federation, 2025, Pat. 2848783 (In Russ.)

5. Tarshis M.Yu., Cherpitskiy S.N., Korolev L.V., Kapranova A.B. *Sposob issledovaniya kachestva smesi komponentov, razlichayushchikhsya po tsvetu* [Method for testing the quality of a mixture of components differing in color], Russian Federation, 2019, Pat. 2690539 (In Russ.)

6. Tarshis M.Yu., Korolev L.V., Zaytsev A.I. *Issledovaniye kachestva sypuchey smesi. Modelirovaniye. Kriterii. Eksperiment: monografiya* [Study of the quality of bulk mixture. Modeling. Criteria. Experiment: monograph], Yaroslavl': Izdatel'stvo YaGTU, 2015, 116 p. (In Russ.)

Untersuchung eines Trommel-Schaufel-Mischers für Schüttgüter und Auswahl seiner Parameter

Zusammenfassung: Diese Studie untersucht den Einfluss der Parameter eines Trommelmischers auf die Qualität des resultierenden Gemisches. Es ist der Einfluss der Schaufelteilung entlang der Mischerachse, ihres Radius und des Schaufelwinkels relativ zum Mischerkörperquerschnitt auf die Homogenität des Gemisches untersucht. Die Ergebnisse sind in Form von Mischkurven dargestellt. Es ist die Formulierung des Optimierungsproblems für die Mischerparameter vorgestellt.

Étude du mélangeur à ténèble et aérodes pointués pour les matières en granules et choix de ses paramètres

Résumé: Sont réalisées des études sur l'influence des paramètres d'un mélangeur à ténèbre et aérodés pointu sur la qualité du mélange obtenu. Est étudiée l'influence de la distance d'installation des aérodés le long de l'axe de l'appareil, de leur rayon d'installation et de l'angle d'inclinaison des aérodés par rapport au plan de section transversale du corps du mélangeur sur l'homogénéité du mélange. Les résultats des recherches sont présentés sous forme des courbes de mélange. Est présentée la formulation de la problématique d'optimisation des paramètres du mélangeur.

Авторы: ***Филинков Леонид Игоревич*** – аспирант кафедры «Теоретическая и прикладная механика»; ***Таршис Михаил Юльевич*** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Теоретическая и прикладная механика»; ***Королев Леонид Владимирович*** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Информационные системы и технологии»; ***Капранова Анна Борисовна*** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Ярославль, Российская Федерация.