

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ
СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В БАРАБАННО-ВИНТОВОМ
СТУПЕНЧАТОМ УСТРОЙСТВЕ**

**П. М. Смирнов¹, М. Г. Костенко², М. Ю. Таршис¹✉,
Л. В. Королев², А. Б. Капранова¹**

*Кафедры: «Теоретическая и прикладная механика» (1), mutarshis@yahoo.com;
«Информационные системы и технологии» (2),
ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет»,
Россия, Ярославль*

Ключевые слова: барабанно-винтовой смеситель; исследования; коэффициент неоднородности; процесс смешивания; сыпучие материалы.

Аннотация. Разработана методика проведения экспериментальных исследований процесса смешивания сыпучих материалов в новом ступенчатом барабанно-винтовом устройстве. Изучено влияние числа и длин рабочих ступеней и других параметров смесителя на однородность получаемой сыпучей смеси компонентов, склонных к сегрегации по физико-механическим свойствам. Сопоставляется эффективность работы одноступенчатого и трехступенчатого смесителей.

Введение

Смешивание сыпучих материалов – процесс, широко распространенный в различных отраслях химической технологии, а также в металлургии, угольной промышленности, строительном производстве, производстве керамики, медикаментов и многих др. Однако практическая реализация данного процесса в большинстве случаев весьма сложна из-за сопутствующей сегрегации смешиваемых компонентов по их физико-механическим свойствам [1], которая особенно сильно проявляется при приготовлении смесей с малой концентрацией ключевого компонента. Различные механизмы сегрегации происходят одновременно со смешиванием и приводят к преждевременному достижению смесью равновесного состояния, не соответствующего ее необходимой однородности. Представленная работа связана с исследованием процесса смешивания сыпучих материалов в барабанно-винтовом аппарате [2], обеспечивающем приготовление однородных смесей с небольшой концентрацией ключевого компонента за счет использования метода «разбавления» при ступенчатом проведении процесса.

Описание смесителя и методики проведения эксперимента

На рисунке 1, а показана схема смесителя [2], содержащего эластичные винтовые камеры 1 – 3, размещенные в цилиндрической трубе 4 коаксиально, с образованием ступеней смешения. Внутри камер расположены лопасти 5. Камеры

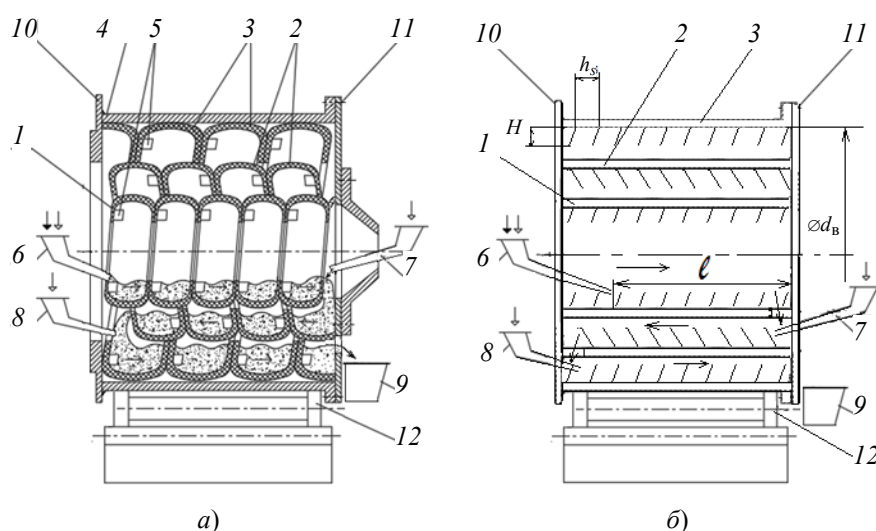


Рис. 1. Схемы ступенчатого барабанно-винтового смесителя (а) и лабораторной установки (б)

(ступени) соединены с патрубками 6 – 8 загрузки компонентов. Труба 4 имеет крышки 10, 11 и соединена с приводом вращения 12. При включении привода труба 4 с камерами 1 – 3 вращается вместе с сыпучими компонентами, поступающими из патрубков 6 – 8. Перемешивание происходит в режиме переката. Лопасты 5 обеспечивают дополнительное конвективное воздействие на смесь. На последующих ступенях 2, 3 механизм смешивания аналогичен. Причем на ступенях 2 и 3 происходит дозагрузка транспортирующего компонента через патрубки 7 и 8 в соотношении 1 : 1 со смесью, образованной на предыдущей ступени, то есть средние концентрации ключевого компонента на ступенях составляют 0,5; 0,25 и 0,125 соответственно. Готовая смесь со ступени 3 попадает в бункер 9.

Экспериментальная установка отличается от представленного смесителя тем, что ступени 1 – 3 выполнены цилиндрическими и имеют прозрачные крышки, аналогичные крышкам 10, 11, а ячейки, в которые подаются компоненты, образованы винтовыми шнеками с лопастями (см. рис. 1, б).

Цель исследований – оценка эффективности применения ступенчатого барабанно-винтового смесителя сыпучих материалов [2] на основе сопоставления его работы с работой одноступенчатого аппарата; установление влияний конструктивных параметров (числа и длин ступеней, высоты и шага винтовых камер) смесителя [2] на качество получаемых сыпучих смесей, склонных к сегрегации.

При исследованиях процесса смешивания в одноступенчатом смесителе отдельно использовался барабан диаметром, равным диаметру ступени 2 (см. рис. 1, б).

Исследуемые параметры системы «смеситель – материалы» и диапазоны их варьирования приняты следующими:

– конструктивные: $d_b = [0,15; 0,23; 0,40]$ м – внутренние диаметры ступеней рабочих камер ступенчатого смесителя; $l = [0,01 – 0,4]$ м – длина пути материала по ступени; внутренний диаметр рабочей камеры одноступенчатого смесителя и длина пути материала: $d_b = 0,23$ м, $l = [0,01 – 1,2]$ м соответственно. Углы наклона лопастей к плоскости поперечного сечения рабочей камеры $\alpha = 45^\circ$. Шаг винтового шнека и его высота по ступеням: $h_{ш} = [0,03; 0,035; 0,05; 0,065]$ м; $H = [0,02; 0,035; 0,05; 0,07]$ м соответственно;

– режимные: n – частота вращения корпуса [30, 60] об/мин, $c = 0,125$ – концентрация ключевого компонента готовой смеси; $c = [0,5; 0,25; 0,125]$ – концентрации ключевого компонента смеси по ступеням;

– физико-механические: средние диаметры частиц компонентов (просо, манная крупа, рапс) $d_1 = 0,00225$ м; $d_2 = 0,0003$ м; $d_3 = 0,00175$ м и насыпная плотность материалов $\rho_1 = 840$ кг/м³; $\rho_2 = 660$ кг/м³; $\rho_3 = 700$ кг/м³ соответственно.

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 II с последующим его анализом [3, 4]. Обработка результатов эксперимента осуществлялась методом наименьших квадратов с дальнейшим поиском уравнения приближенной регрессии, связывающего коэффициент неоднородности смеси с параметрами смесителя. Для оценки качества аппроксимации, как и в работах [4, 5], использована величина достоверности R^2 [6]. Длина пути материала (рабочая длина ступени l) варьировалась изменением места загрузки компонентов через патрубки $\delta - \delta$.

Результаты исследований

Зависимости коэффициента неоднородности смеси V_c от длин соответствующих ступеней показаны на рис. 2, $a - в$, где значки – экспериментальные точки, линии – аппроксимирующие функции. На рисунках кривая смешивания 1 – результат аппроксимации эксперимента в интервале $l = [0,01 - 1,2]$ м. Она отражает изменение коэффициента неоднородности смеси в одноступенчатом барабанно-винтовом смесителе в зависимости от длины барабана l :

$$V_c = 51,9e^{-36,3l} + 13,5; R^2 = 0,92.$$

Для удобства сопоставления поведения коэффициента неоднородности смеси в одноступенчатом смесителе и трехступенчатом аппарате кривая 1 (для одноступенчатого смесителя) приведена на каждом из рис. 2, $a - в$. Кривая смешивания 2 отражает изменение коэффициента неоднородности смеси в ступенчатом барабанно-винтовом смесителе в зависимости от длины ступени l . Кривая смешивания 2 (см. рис. 2, a) показывает поведение смеси на первой (внутренней) ступени. Кривая 2 (см. рис. 2, $б$) отражает поведение смеси на промежуточной ступени, а на рис. 2, $в$ – изменение коэффициента неоднородности смеси в зависимости от длины внешней (третьей) ступени. Ниже приведены результаты аппроксимации экспериментальных значений коэффициента неоднородности смеси и величины коэффициента достоверности R^2 на трех ступенях соответственно:

$$\text{первая: } V_c = 51,02e^{-29,9l} + 9,02; R^2 = 0,999;$$

$$\text{вторая: } V_c = 3,75 \cdot 10^5 e^{-24,93l} + 13,87; R^2 = 0,95;$$

$$\text{третья: } V_c = 3,75 \cdot 10^7 e^{-17,15l} + 10,3; R^2 = 0,93.$$

Следует отметить, что всплеск значений V_c для кривых смешивания 2 в местах дополнительной подачи транспортирующего компонента на второй и третьей ступенях при $l = 0,4$ м и $l = 0,8$ м (см. рис. 2, $б$ и $в$) связан с реализацией метода разбавления. В дальнейшем кривая 2 «уходит» ниже кривой 1 (см. рис. 2, $в$), что отражает эффективность трехступенчатого аппарата [2] относительно одноступенчатого смесителя.

На рисунке 3, a и $б$ представлены результаты исследований влияния конструктивных параметров смесителя, а именно шага винтового желоба $h_{ш}$ и высоты винтовой поверхности H (см. рис. 1, $б$).

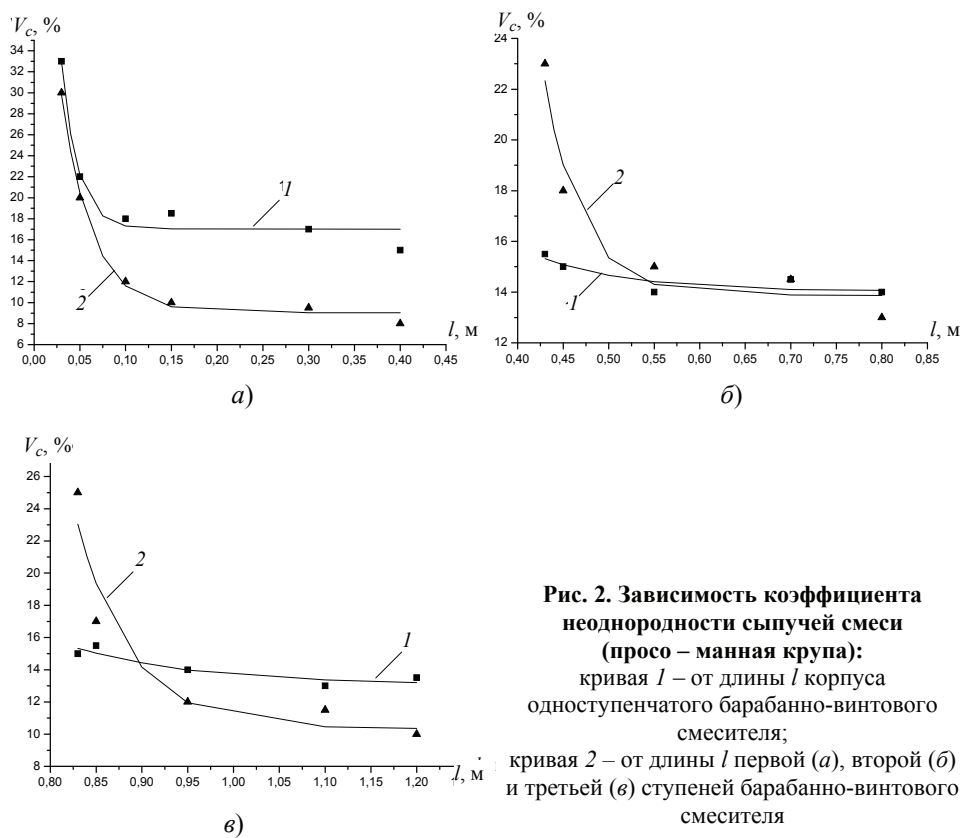


Рис. 2. Зависимость коэффициента неоднородности сыпучей смеси (просо – манная крупа):
 кривая 1 – от длины l корпуса одноступенчатого барабанно-винтового смесителя;
 кривая 2 – от длины l первой (а), второй (б) и третьей (в) ступеней барабанно-винтового смесителя

Ниже приведены результаты аппроксимации экспериментальных значений коэффициента неоднородности смеси для кривых 1 – 3 (см. рис. 3) с помощью экспонент:

$$1 - V_c = 32,26e^{-19,53l} + 14,7; R^2 = 0,995;$$

$$2 - V_c = 46,7e^{-34,7l} + 12,6; R^2 = 0,961;$$

$$3 - V_c = 76,6e^{-51l} + 10,88; R^2 = 0,96.$$

Из рисунка 3, а видно, что с уменьшением шага винтовой поверхности растет качество (однородность) получаемой смеси. Однако необходимо отметить, что с уменьшением шага $h_{ш}$, при постоянной угловой скорости корпуса смесителя, падает его производительность. Поведение кривых смешивания (см. рис. 3, б) указывает на рост однородности смеси с увеличением высоты винтовой поверхности H , что очевидно связано с ростом коэффициента загрузки рабочей камеры смесителя. Кривые смешивания также получены при аппроксимации экспериментальных значений экспонентами:

$$\text{кривая 1} - V_c = 23,97e^{-57H} + 8,375; R^2 = 0,999;$$

$$\text{кривая 2} - V_c = 31,56e^{-51,3H} + 9,97; R^2 = 0,999.$$

Значения критерия R^2 , близкие к единице, указывают на высокий уровень достоверности аппроксимации.

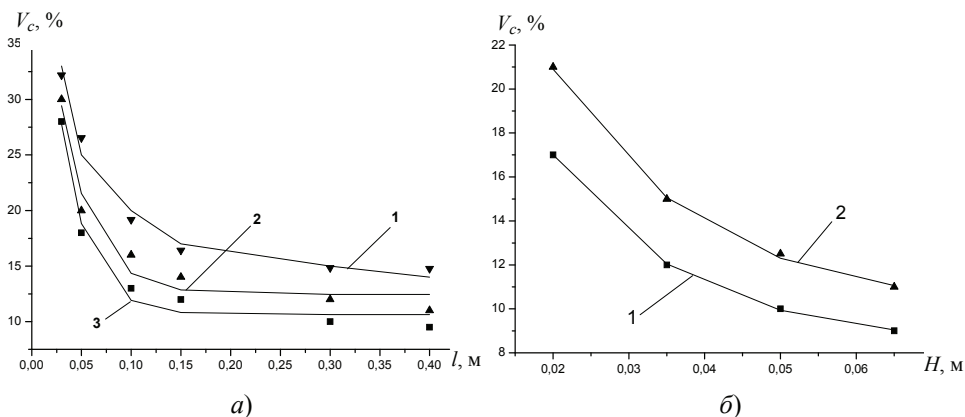


Рис. 3. Зависимость коэффициента неоднородности сыпучей смеси (просо – рапс):
a – от длины корпуса одноступенчатого смесителя при различных значениях шага винтового желоба $h_{ш}$, м: 1 – 0,03, 2 – 0,05, 3 – 0,065;
б – от высоты борта рабочей камеры H , при $h_{ш} = 0,05$ м и различных диаметрах корпуса смесителя $d_{в}$, м: 1 – 0,23, 2 – 0,4

Заключение

По результатам проведенных исследований сделаны следующие выводы:

- эффективность одноступенчатого аппарата падает при достижении длины его корпуса 1,5 длины ступени. При этом равновесное значение коэффициента неоднородности достигает $V_c \approx 13,5$ %;

- ступенчатый барабанно-винтовой смеситель [2] позволяет поддерживать наилучшие условия смешивания, когда целевая смесь ($c = 0,125$) формируется постепенно и на выходе из последней ступени имеет приемлемую однородность ($V_c \approx 10$ %);

- исследования показывают преимущество трехступенчатого барабанно-винтового аппарата перед одноступенчатым смесителем при переработке смесей, склонных к сегрегации, как по крупности частиц, так и по их плотности, а также смесей, отличающихся малой концентрацией ключевого компонента;

- получаемые кривые смешивания типа кривых 2 (см. рис. 2, *a* – *б*) могут использоваться при постановке задач оптимального проектирования ступенчатых аппаратов;

- кривые смешивания, связывающие критерий качества смеси, получаемой в барабанно-винтовом устройстве, с его конструктивными параметрами, могут быть использованы при проектировании.

Список литературы

1. Макаров, Ю. И. Аппараты для смешения сыпучих материалов / Ю. И. Макаров. – М. : Машиностроение, 1973. – 216 с.
2. Пат. 2812190. Российская Федерация. МПК В01F 3/18. Смеситель сыпучих материалов / Таршис М. Ю. Смирнов П. М., Королев Л. В., Капанова А. Б.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет». – № 2023114105 ; заявл. 29.05.2023 ; опубл. : 24.01.2024, Бюл. № 3. – 5 с.
3. Пат. 2385454. Российская Федерация. МПК В01F 3/18. Способ исследования качества смеси компонентов, различающихся по цвету / Таршис М. Ю., Коро-

лев Л. В., Зайцев А. И. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет». – № 20008144214 ; заявл. 06.11.2008 ; опубл. 27.03.2010, Бюл. № 9. – 5 с.

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

5. Смирнов, П. М. Исследование барабанно-винтового ступенчатого смесителя сыпучих материалов / П. М. Смирнов, М. Г. Костенко, М. Ю. Таршис, Л. В. Королев, А. Б. Капанова // Математические методы в технологиях и технике. – 2024. – № 9. – С. 21 – 24. doi: 10.52348/2712-8873

6. Дрейпер, Н. Прикладной регрессионный анализ / Н. Дрейпер, Г. Смит. – М. : Финансы и статистика, 1986. – 369 с.

A Study of the Mixing Process of Bulk Materials in a Step-Screw Drum Mixer

P. M. Smirnov¹, M. G. Kostenko², M. Yu. Tarshis[✉],
L. V. Korolev², A. B. Kapranova¹

*Departments: Theoretical and Applied Mechanics (1), mutarshis@yahoo.com;
Information Systems and Technologies (2),
Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia*

Keywords: drum-screw mixer; research; heterogeneity coefficient; mixing process; bulk materials.

Abstract: A methodology for conducting experimental studies of the mixing process of bulk materials in a new step-screw drum mixer has been developed. The influence of the number and length of working stages and other mixer parameters on the homogeneity of the resulting bulk mixture of components prone to segregation based on physical and mechanical properties was studied. The operating efficiency of single-stage and three-stage mixers was compared.

References

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

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

3. Tarshis M.Yu., Korolev L.V., Zaitsev A.I. *Sposob issledovaniya kachestva smesi komponentov, razlichayushchihsya po tsvetu* [Method of analyzing the quality of a mixture of components differing in colour], Russian Federation, 2010, Pat. 2385454. (In Russ.).

4. Tarshis M.Yu., Korolev L.V., Zaytsev A.I. *Issledovaniye kachestva sypuchey smesi. Modelirovaniye. Kriterii. Eksperiment: monografiya* [Investigation of the quality of loose mixes. Modeling. Criteria. Experiment: monograph], Yaroslavl: Izdatel'skiy dom YAGTU, 2015, 116 p. (In Russ.)

5. Smirnov P.M., Kostenko M.G., Tarshis M.Yu., Korolev L.V., Kapranova A.B. [Investigation of the bulk materials mixing process in devices with additional working elements], *Matematicheskie metody v technologiayah i tehnikе* [Mathematical Methods in

Technology and Engineering], 2024, no 9, pp. 21-24, doi 10.52348/2712-8873_MMTT_2024_9_21 (In Russ., abstract in Eng.).

6. Draper N., Smith H. *Prikladnoi regressionnyi analiz* [Applied Regression Analyses], Moscow, 1973, 392 p. (In Russ.)

Untersuchung des Mischprozesses von Schüttgütern in der Trommel-Schnecken-Stufenvorrichtung

Zusammenfassung: Es ist eine Methodik zur Durchführung experimenteller Untersuchungen des Mischprozesses von Schüttgütern in dem neuen Stufentrommel-Schneckenmischer entwickelt. Der Einfluss der Anzahl und Länge der Arbeitsstufen sowie anderer Mischerparameter auf die Homogenität der resultierenden Schüttgutmischung von Komponenten, die aufgrund ihrer physikalischen und mechanischen Eigenschaften zur Entmischung neigen, ist untersucht. Die Betriebseffizienz von einstufigen und dreistufigen Mixern ist verglichen.

Étude du processus du mélange des matériaux en vrac dans le dispositif à vis à tambour

Résumé: Est élaborée une méthode pour effectuer des études expérimentales du processus de mélange des matériaux en vrac dans un nouveau dispositif à vis à barreaux. Sont étudiés l'influence du nombre et de la longueur des étapes de travail ainsi que d'autres paramètres du mélangeur sur l'homogénéité du mélange en vrac obtenu des composants sujets à la ségrégation en termes de propriétés physico-mécaniques. Sont comparées les performances des mélangeurs à un étage et à trois étages.

Авторы: *Смирнов Павел Михайлович* – аспирант кафедры «Теоретическая и прикладная механика»; *Костенко Максим Григорьевич* – аспирант кафедры «Информационные системы и технологии»; *Таршиц Михаил Юльевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая и прикладная механика»; *Королев Леонид Владимирович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные системы и технологии»; *Капанова Анна Борисовна* – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика» ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Ярославль, Россия.