



УДК: 621.929.6

# *СИСТЕМА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СЫПУЧЕЙ СМЕСИ В БАРАБАННОМ УСТРОЙСТВЕ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ*

*М.Ю. Таршис, Л.В. Королев, С.Н. Черпицкий, А.Б. Капранова*

*Михаил Юльевич Таршис*

*E-mail: : tarshismy@ystu.ru*

*Сергей Николаевич Черпицкий*

*E-mail: cherpitskiisn@ystu.ru*

*Анна Борисовна Капранова*

*E-mail: kapranovaab@ystu.ru*

*Леонид Владимирович Королев*

*E-mail: korolevly@ystu.ru*

*Кафедра теоретической механики и сопротивления материалов,  
Ярославский государственный технический университет,  
Московский просп., 88, Ярославль, Российская Федерация, 150023*

*Кафедра прикладной математики и вычислительной техники,  
Ярославский государственный технический университет,  
Московский просп., 88, Ярославль, Российская Федерация, 150023*



*Разработана система контроля качества сыпучей смеси, получаемой в устройстве непрерывного действия. Контролируемым параметром является критерий однородности смеси, по которому и оценивается её качество. В основе метода контроля лежит способ определения свойств сыпучей смеси по распределению частиц перерабатываемых компонентов в поперечном сечении, фиксируемому при прохождении через прозрачную перегородку на выходе из устройства. Эффективность методики обеспечивается использованием бесконтактного метода оценки однородности сыпучего состава, применение которого исключает искажение пространственного распределения частиц в сочетании с интегральным критерием оценки однородности смеси, отличающимся высокой информативностью.*

**Ключевые слова:** контроль качества, сыпучая смесь, однородность, метод оценки, интегральный критерий, информативность

**Для цитирования:**

Таршис М.Ю., Королев Л.В., Черницкий С.Н., Капранова А.Б.. Система контроля качества сыпучей смеси в барабанном устройстве непрерывного действия. Умные композиты в строительстве. 2020. Т. 1. Вып. 1. С. 56-64 URL: [http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1\\_2020](http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1_2020)

**DOI:** 10.52957/27821919\_2020\_1\_56



UDC 621.929.6

# QUALITY CONTROL SYSTEM FOR BULK MIX IN A CONTINUOUS DRUM DEVICE

*M.Y. Tarshis, L.V. Korolev, S.N. Cherpitsky, A B. Kapranova*

*Mikhail Y. Tarshis*

*E-mail: : tarshismy@ystu.ru*

*Sergey N. Cherpitsky*

*E-mail: cherpitskiisn@ystu.ru*

*Anna B. Kapranova*

*E-mail: kapranovaab@ystu.ru*

*Leonid V. Korolev*

*E-mail: korolevly@ystu.ru*

*Department of Theoretical Mechanics and Materials Resistance, Yaroslavl State Technical University, 88, Moskovsky Prosp., Yaroslavl, Russia, 150023*

*Department of Applied Mathematics and Computer Engineering, Yaroslavl State Technical University, 88, Moskovsky Prosp., Yaroslavl, Russia, 150023*



*Within the course of study, we have developed the system of quality control of bulk mix blended in a continuously operating device. The controlled parameter is the homogeneity criterion of the mixture which is used to assess its quality. The control method is based on the method of determining the properties of the bulk mixture by the distribution of particles of the processed components in the cross section, which is fixed when passing through a transparent partition at the device outlet. The effectiveness of the methodology is ensured by using a non-contact method of assessing the homogeneity of bulk contents. This method eliminates the distortion of the spatial distribution of particles in combination with the integral criterion for assessing the homogeneity of the mixture, which is highly informative.*

**Key words:** *quality control, bulk mixture, uniformity, evaluation method, integral criterion, informativeness*

**For citation:**

*Tarshis M.Y., Korolev L.V., Cherpitsky S.N., Kapranova A.B. Quality control system for bulk mix in a continuous drum device. Smart Composite in Construction. 2020. V. 1. N 1. P. 56-64 URL: [http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1\\_2020](http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1_2020)*

**DOI:** 10.52957/27821919\_2020\_1\_56



## ВВЕДЕНИЕ

Задача проектирования устройства для приготовления сыпучих материалов, как и любого технического устройства, решается на основе анализа результатов экспериментальных и теоретических исследований реализуемого им процесса. Как правило, в результате таких исследований могут быть получены зависимости, связывающие критерий качества продукта (смеси) с параметрами смесительной системы (смеситель, дозаторы, материалы) [1, 2]. Однако при практической реализации процесса могут меняться внешние условия его протекания как в силу возникновения случайных факторов, так и при использовании устройства для переработки материалов, параметры которых находятся за пределами проведенных исследований. При этом параметры качества получаемых составов могут выходить за допустимые пределы. В этом случае необходимо обеспечение непрерывного контроля качества смеси и, при необходимости, проведение корректировки параметров смесительной системы.

В данной работе рассматривается система контроля качества сыпучей смеси в барабанных устройствах непрерывного действия. Барабанные смесители непрерывного действия широко применяются в ряде отраслей строительного производства, химической промышленности, металлургии, сельского хозяйства и во многих других. За последние годы предложен ряд конструкций устройств такого типа [3, 4], отличающихся эффективностью при работе в неблагоприятных условиях (в том числе, устройства для приготовления смесей, склонных к сегрегации частиц, их агломерации, устройства для переработки составов, содержащих добавки в малой концентрации и т.д.). Именно такие устройства непрерывного действия должны быть оснащены системой непрерывного контроля и корректировки качества получаемого состава. С другой стороны, система контроля особенно необходима для получения материалов, необходимые свойства которых обеспечиваются точностью концентраций компонентов, входящих в смесь.

### ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СЫПУЧЕЙ СМЕСИ В УСТРОЙСТВЕ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Конечной целью осуществления контроля качества сыпучей смеси, получаемой в смесительной системе, является поддержание параметров качества смеси в требуемых пределах, путем конструктивных и режимных воздействий на саму систему. На рис. 1 показан вариант реализации системы контроля качества сыпучей смеси барабанно-лопастных устройствах непрерывного действия [5, 6]. Система и агрегат включают смеситель 1 с приводом 2, патрубки загрузки компонентов 3, 4 и соответствующую дозирующую устройства 5, 6, бункер 7 – выгрузки смеси. Торцевая стенка 8 (борт, подпорное кольцо) или её фрагмент выполнен из прозрачного материала. Видеокамеры 9 установлены напротив стенки 8 и над транспортером 10 смеси. Информация с камер 9 поступает на компьютер 11 и выводится на экран монитора 12.

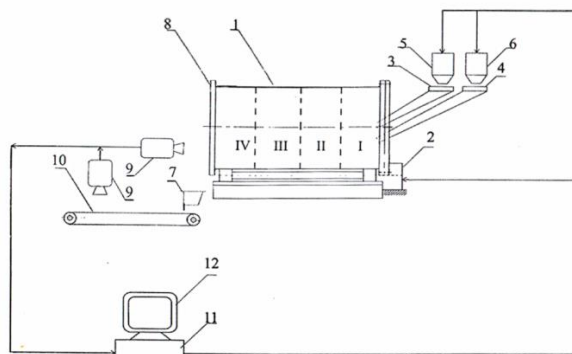


Рис. 1. Система контроля и корректировки качества сыпучей смеси в барабанном агрегате  
Fig. 1. System for monitoring and adjusting the quality of the bulk mixture in the drum unit

Необходимо отметить, что для контроля качества сыпучей смеси важную роль имеет выбор метода получения информации о распределении компонентов в объеме смеси. Такой выбор должен быть основан на анализе известных экспериментальных методик, которые можно разделить на контактные [1, 2, 7] и бесконтактные [4, 8-16]. В данном случае принят бесконтактный метод оценки, основанный на анализе фотоизображения плоского сечения смеси через прозрачную стенку [13, 14, 16]. Этот метод эффективен из-за его низкой трудоемкости, скорости и точности (в силу отсутствия при его использовании искажений структуры смеси). В качестве критерия оценки качества (однородности) смеси используются традиционный коэффициент неоднородности, широко применяемый в нашей стране [1, 2]:

$$V_C = \frac{100}{c_0} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (c_i - c_0)^2}, \% \quad (1)$$

где  $c_i$  – массовая (или объемная) концентрация ключевого компонента в  $i$ -пробе;

$n$  – количество проб;

$c_0$  – средняя концентрация ключевого компонента по объему смеси.

В качестве другого информативного критерия параллельно используется интегральный аналог коэффициента неоднородности [15, 17], позволяющий дать оценку качества в широком диапазоне масштабов проб:

$$v_c(l) = \frac{1}{c_0(1-c_0)} \left( \overline{c(\vec{R}, l)} - \langle \overline{c(\vec{R}, l) \rangle}_R \right)^2 \quad (2)$$

где  $\overline{c(\vec{R}, l)}$  – объемная концентрация ключевого компонента в пробе размером  $l$ , взятой в окрестности точки  $\vec{R}$ ;

$c_0$  – объемная доля ключевого компонента во всей смеси;

$D = 1, 2, 3$  – размерность пространства;

$\int_{K(l)} dr^D$  обозначает интегрирование по  $D$ -мерному кубу с ребром длины  $l$  и с центром в точке  $\vec{R}$ ;

$\vec{r}$  – радиус-вектор, определяющий положение частицы ключевого компонента.



## ОПИСАНИЕ БЛОК-СХЕМЫ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СЫПУЧЕЙ СМЕСИ

На рис. 2 представлена блок-схема осуществления контроля и корректировки качества сыпучей смеси, получаемой в барабанно-лопастном агрегате.

Кратко рассмотрим этапы осуществления контроля и корректировки качества сыпучей смеси в соответствии с данной блок-схемой. На первом этапе устанавливаются ограничения  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  на отклонения текущего значения критерия  $V_c$  качества (однородности) получаемой смеси от ее заданного значения  $[V_c]$ .

4) задают блоки 9-12. При выполнении условия заданного в блоке 5 осуществляются конструктивные изменения, определяемые блоком 6.

В основу системы контроля и корректировки качества сыпучей смеси в барабанно-лопастном агрегате непрерывного действия положена методика бесконтактного определения качества смеси по изображению плоского сечения рабочего объема. Методика позволяет фиксировать качество смеси, исследовать эволюцию однородности перерабатываемой смеси, не внося искажений в пространственное распределение частиц компонентов в любой точке сечения рабочего объема на выходе смесителя и не прерывая его работу.

О качестве смеси, получаемой в барабанно-лопастном аппарате непрерывного действия можно судить по распре-

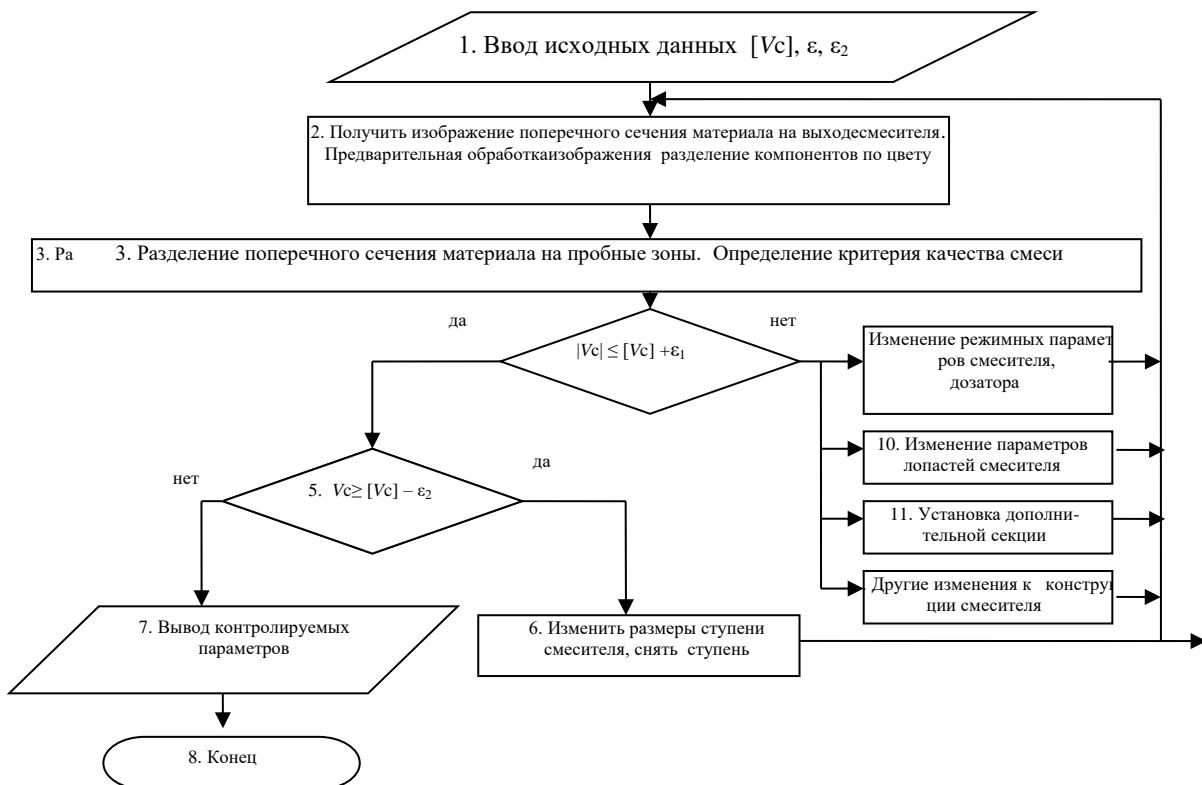


Рис. 2. Блок-схема осуществления контроля и корректировки качества сыпучей смеси в барабанно-лопастном агрегате непрерывного действия

Fig. 2. Flowchart for monitoring and adjusting the quality of the bulk mixture

Методику определения критерия качества смеси отражают блоки 2 и 3 на схеме, представленной на рис. 2. Контроль ограничений  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  осуществляется блоками 4 и 5. Ограничение  $\varepsilon_1$  определяет предельно допустимое верхнее значение критерия  $V_c$  (допустимую неоднородность смеси), а  $\varepsilon_2$  – предельно допустимое нижнее значение критерия  $V_c$  (допустимую однородность смеси). То есть

$$[V_c] - \varepsilon_2 \leq V_c \leq [V_c] + \varepsilon_1 \quad (3)$$

Следует отметить, что  $\varepsilon_2$  устанавливает ограничение неоправданного роста металлоемкости смесительного оборудования.

Корректировки параметров смесительной системы при невыполнении условия, определенного ограничением  $\varepsilon_1$  (блок

делению частиц смешиваемых фракций в сечении, перпендикулярном оси устройства на выходе из него, на фронтальной поверхности сыпучей массы, которую можно сделать доступной для непосредственного визуального наблюдения и фиксации изображения (например, цифровой видеосъемкой). В свою очередь, анализ получаемых при этом плоских распределений может быть легко осуществлен с помощью современных методов компьютерной обработки изображений.

## МЕТОД ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СМЕСИ

Традиционные методы [1, 2, 7], предусматривающие отбор контрольных проб по всему объему сыпучей массы с



последующим их анализом, как правило, не вполне удовлетворяют этим требованиям, даже если предполагают использование сложного оборудования для отбора и анализа проб. Современные методы исследования процессов смешивания требуют оценки вкладов в них конвективных и диффузионных механизмов смешивания, непосредственно связанных с конструктивными особенностями смесителя и физико-механическими характеристиками смесей [18]. Поэтому, при оценке качества смеси необходимо сохранение наиболее полной информации о ее структуре на микроскопических (сравнимых с размером частицы) и на макроскопических (порядка размеров рабочего объема смесителя) масштабах [1, 2, 13]. Это может быть обеспечено использованием бесконтактных методов анализа смеси непосредственно в устройстве или в потоке на выходе из него и применением для оценки качества смеси новых спектральных критериев, учитывающих степень однородности пространственного распределения ключевого компонента в широком спектре масштабов.

Рассмотрим подробнее бесконтактный метод [4, 13], который был использован для практической оценки качества смеси в процессе ее переработки в барабанных устройствах непрерывного действия. Стенка 8 корпуса смесителя 1 (рис. 1), примыкающая к боковой поверхности рабочего объема, выполнена из прозрачного материала, что обеспечило возможность визуального контроля, фиксации и цифрового анализа процесса смешивания. Черно-белое фотографическое изображение поверхности рабочего объема смесителя подвергается компьютерной обработке, в ходе которой на фотографии сначала отделяется область, занятая смесью (рис. 3).

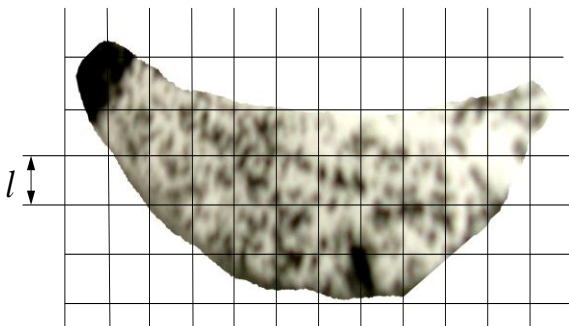


Рис. 3. Отделение сечения, занятого смесью, и разбиение на пробные зоны

Fig. 3. Separating the section occupied by the mixture and dividing it into test zones

Эта область разбивается на квадратные пробные зоны одинакового размера  $l$ , в каждой из которых концентрация ключевого компонента  $c_i^{(2D)}$  вычисляется как отношение площади зоны, занятой ключевым компонентом, к площади всей зоны.

При этом точка отделения ключевого компонента от несущего на шкале оттенков серого цвета определяется как точка минимума многочлена четвертой степени, аппроксимирующего распределение пикселей (рис. 4).

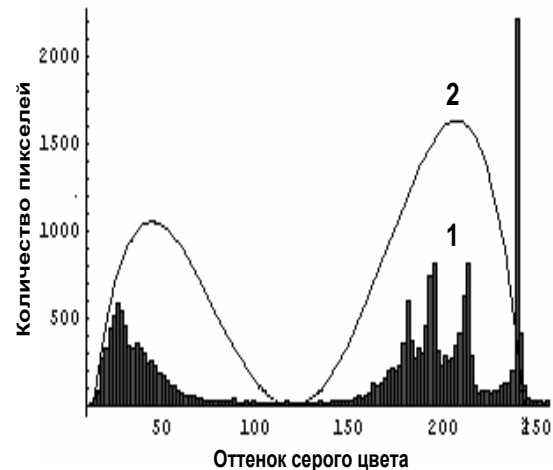


Рис. 4. Определение точки отделения ключевого компонента на шкале оттенков серого цвета: 1 – распределение пикселей по оттенкам серого цвета; 2 – аппроксимация распределения многочленом четвертой степени

Fig. 4. Determining the separation point of a key component on the grayscale:

1 – distribution of pixels by grayscale;  
2 – approximation of the distribution by a fourth-degree polynomial

Затем по найденным концентрациям  $c_i^{(2D)}$  вычисляется коэффициент неоднородности  $V_c^{(2D)}$ . Полученный коэффициент неоднородности концентрации ключевого компонента смеси на плоском изображении  $V_c^{(2D)}$  может отличаться от коэффициента вариации, полученного традиционным способом на основе анализа объемных проб  $V_c$  при одной и той же концентрации в примыкающей к пробной зоне участке объемного слоя, так как на фиксируемой поверхности зоны может оказаться различное число частиц ключевого компонента.

Оценка дополнительного разброса объемного коэффициента неоднородности [4] и определяется пределами:

$$V_c = \sqrt{\max(0, (V_c^{(2D)})^2 - 3\sigma)} \div \sqrt{(V_c^{(2D)})^2 + 3\sigma}, \quad (4)$$

$$\text{где } \sigma = 4(d/l)\sqrt{(1-c_0)/c_0n}.$$

Таким образом, методика бесконтактного контроля качества смеси должна включать следующую последовательность операций:

- получение (фиксация) изображения сечения рабочего объема через прозрачную стенку 8 (рис. 1);
- выделение и предварительная обработка части области занятой смесью (рис. 3);
- нахождение точки отделения ключевого компонента от несущего на шкале оттенков серого цвета (рис. 4);
- разделение сечения смеси на пробные участки и вычисление критерия качества:
- вычисление объемного коэффициента неоднородности.

Для реализации указанной последовательности использована компьютерная программа [16]. Таким образом, изложенный бесконтактный метод оценки однородности смеси предполагает последовательную в течение процесса



фиксацию изображений плоских поверхностных распределений частиц смешиваемых компонентов, их компьютерную обработку с целью получения статистических характеристик и вычисление реальных критериев однородности. Методика позволяет значительно повысить исследовательские возможности по определению качества смеси.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Макаров Ю.И.** Аппараты для смешения сыпучих материалов. М.: Машиностроение. 1973. 216 с.
2. **Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Арутюнов С.Ю.** Системный анализ процессов химической технологии. Процессы измельчения и смешивания сыпучих материалов. М.: 1985. 440 с.
3. **Таршиш М.Ю., Королев Л.В., Зайцев А.И.** Теория и принципы моделирования процесса смешивания сыпучих материалов и создания устройств с гибкими элементами для его реализации: моногр. Ярославль: Изд. дом ЯГТУ. 2011. 100 с.
4. **Таршиш М.Ю., Королев Л.В., Зайцев А.И.** Исследование качества сыпучей смеси. Моделирование. Критерии. Эксперимент: моногр. Ярославль: Изд. дом ЯГТУ. 2015. 116 с.
5. **Таршиш М.Ю., Черницкий С.Н., Королев Л.В., Зайцев А.И.** Патент РФ № 2626203. 2017.
6. **Таршиш М.Ю., Черницкий С.Н., Королев Л.В., Зайцев А.И.** Патент РФ № 2618065. 2017.
7. **Prigozhin L., Kalman H.** Radial mixing and segregation of a binary mixture in a rotating drum: Model and experiment. *Phys. Rev. E* 57. 1998. P. 2073-2080.
8. **Lai C.-K., Holt D., Leung J.C., Cooney C.L., Raju G.K., Hansen P.** Real time and noninvasive monitoring of dry powder blend homogeneity. *AIChE J.* 2001. V. 47. P. 2618.
9. **Unger D.R., Muzzio F. J.** Laser-induced fluorescence technique for the quantification of mixing in impinging jets. *AIChE J.* 1999. V. 45. P. 477.
10. **Hill K.M., Caprihan A., Kakalios J.** Bulk Segregation in Rotated Granular Material Measured by Magnetic Resonance Imaging. *Phys. Rev. Lett.* 1997. V.78. P. 50.
11. **Kuperman V.Y.** Nuclear Magnetic Resonance Measurements of Diffusion in Granular Media. *Phys. Rev. Lett.* 1996. V.77. P. 1178.
12. **Шубин И.Н.** Разработка конструкций и методики расчета гравитационных смесителей для сыпучих материалов. Автореф. дисс. канд техн. наук. Тамбов. 2002. 16 с.
13. **Королев Л.В., Таршиш М.Ю.** Метод оценки качества смешения сыпучих материалов по распределению частиц в плоском сечении рабочего объема. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2002. Т. 45. Вып. 1. С. 98-100.
14. **Таршиш М.Ю., Черницкий С.Н., Королев Л.В., Капранова А.Б.** Патент РФ № 2690539. 2019.
15. **Королев Л.В., Таршиш М.Ю.** Спектральный критерий однородности смеси и его применение для характеристики процессов смешивания. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2002. Т. 45. Вып. 7. С. 99-101.
16. **Волков М.В.** Метод расчета процесса смешивания сыпучих материалов в новом аппарате с открытой рабо-

чей камерой. Дисс. канд. техн. наук. Ярославль. 2014. 137 с.

17. **Черницкий, С.Н., Таршиш М.Ю., Королев Л.В.** Разработка эффективных методов и критериев оценки качества смешивания сыпучих материалов: Межд. науч.-техн. форум. Первые межд. Косыгинские чтения. 2017. Т. 1. С. 197-199.
18. **Fan L.T., Chen Y.M., Lai F. S.** Recent developments in solid mixing. *Powder Technol.* 1990. V. 61. P. 255-287.

Поступила в редакцию 15.09.2020

Принята к опубликованию 16.10.2020

## REFERENCES

1. **Makarov Yu.I.** Apparatuses for bulk materials mixing. M.: mechanical engineering. 1973. 216 p. (in Russian).
2. **Kafarov V.V., Dorokhov I.N., Arutyunov S.Yu.** System analysis of chemical technology processes. Grinding and mixing processes of bulk materials. M.: 1985. 440 p. (in Russian).
3. **Tarshis M.Yu., Korolev L.V., Zaitsev A.I.** Theory and principles of modeling the process of mixing bulk materials and creating devices with flexible elements for its implementation. Monograph. Yaroslavl: YAGTU Publishing House. 2011. 100 p. (in Russian).
4. **Tarshis M.Yu., Korolev L.V., Zaitsev A.I.** Research of the quality of a loose mixture. Modeling. Criteria. Experiment. Monograph. Yaroslavl: YAGTU Publishing House, 2015. 116 p. (in Russian).
5. **Tarshis M. Yu., Cherpitsky S. N., Korolev L. V., Zaitsev A. I.** Patent RU N 2626203. 2017 (in Russian).
6. **Tarshis M. Yu., Cherpitsky S. N., Korolev L. V., Zaitsev A. I.** Patent RU N 2618065. 2017 (in Russian).
7. **Prigozhin L., Kalman H.** Radial mixing and segregation of a binary mixture in a rotating drum: Model and experiment. *Phys. Rev. E.* 57. 1998. P. 2073-2080.
8. **Lai C.-K., Holt D., Leung J.C., Cooney C.L., Raju G.K., Hansen P.** Real time and noninvasive monitoring of dry powder blend homogeneity. *AIChE J.* 2001. V. 47. P. 2618.
9. **Unger D.R., Muzzio F. J.** Laser-induced fluorescence technique for the quantification of mixing in impinging jets. *AIChE J.* 1999. V. 45. P. 477.
10. **Hill K.M., Caprihan A., Kakalios J.** Bulk Segregation in Rotated Granular Material Measured by Magnetic Resonance Imaging. *Phys. Rev. Lett.* 1997. V.78. P. 50.
11. **Kuperman V.Y.** Nuclear Magnetic Resonance Measurements of Diffusion in Granular Media. *Phys. Rev. Lett.* 1996. V.77. P. 1178.
12. **Shubin I.N.** Development of designs and calculation methods for gravity mixers for bulk materials. Author's abstract. Cand. techn. science. Diss. Tambov. 2002. 16 p. (in Russian).
13. **Korolev L.V., Tarshis M.Yu.** Method for assessing the quality of mixing of bulk materials by the distribution of particles in a flat section of the working volume. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Technol.* 2002. T. 45. I. 1. P. 98-100 (in Russian).
14. **Tarshis M.Yu., Cherpitsky S.N., Korolev L.V., Kapranova A.B.** Patent RU. N 2690539. 2019 (in Russian).
15. **Korolev L.V., Tarshis M.Yu.** Spectral criterion of homogeneity of a mixture and its application for the characteris-





- tics of mixing processes. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Technol.* 2002. I. 7. P. 99-101 (in Russian).
16. **Volkov M.V.** Method of calculating the process of mixing bulk materials in a new apparatus with an open working chamber. *Cand. techn. science. Diss. Yaroslavl*, 2014. 137 p. (in Russian).
17. **Cherpitsky S.N., Tarshis M.Yu., Korolev L.V.** Development of effective methods and criteria for assessing the quality of mixing bulk materials: *Int. sci. and techn. forum. First Kosygin's Readings.* 2017. V. 1. P. 197-199 (in Russian).
18. **Fan L.T., Chen Y.M., Lai F.S.** Recent developments in solid mixing. *Powder Technol.* 1990. V. 61. P. 255-287

Received 15.09.2020

Accepted 16.10.2020