



УДК 66.022.54

Экспериментальное исследование качества продукции в гравитационном аппарате для смешивания сыпучих материалов

И.И. Верлока, А.Б. Капранова, Д.В. Стенько, А.Е. Лебедев, А.А. Ватагин

Иван Игоревич Верлока

Кафедра теоретической и прикладной механики, Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация

E-mail: ivdean@inbox.ru

Анна Борисовна Капранова

Кафедра теоретической и прикладной механики, Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация

E-mail: kapranova_anna@mail.ru

Дмитрий Владимирович Стенько

Кафедра теоретической и прикладной механики, Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация

E-mail: dvs3@yandex.ru

Антон Евгеньевич Лебедев

Кафедра технологических машин и оборудования, Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация

E-mail: lebedevae@ystu.ru

Александр Александрович Ватагин

Кафедра технологических машин и оборудования, Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация

E-mail: vatagerr@bk.ru



В статье представлены результаты исследования качества (коэффициента неоднородности) получаемых дисперсных смесей трудноразделимых материалов I-III класса сыпучести по методике Керра при соотношении компонентов 1:10 и более. На лабораторной гравитационной установке реализован запатентованный трехстадийный порционный метод смешивания, позволяющий свести к минимуму влияние на однородность последствий адгезионных и сегрегационных эффектов. Вычисление показателя качества выполнялось контактным способом, также являющимся объектом интеллектуальной собственности. Целесообразность применения трехстадийного метода в строительной и других сферах обоснована полученными минимальными значениями коэффициента неоднородности ($V_c=6.1\%$) при рациональных диапазонах управляемых параметров лабораторного смесителя. Проведено сравнение с более энергозатратным четырехстадийным способом смешивания компонентов (1:10 и выше).

Ключевые слова: коэффициент неоднородности, смешивание, строительные смеси, сыпучие материалы, дисперсная среда, лабораторная установка, трехстадийный способ, четырехстадийный способ

Для цитирования:

Верлока И.И., Капранова А.Б., Стенько Д.В., Лебедев А.Е., Ватагин А.А. Экспериментальное исследование качества продукции в гравитационном аппарате для смешивания сыпучих материалов. *Умные композиты в строительстве*. 2021. Т. 2. №. 4. С. 46-61 URL: http://comincon.ru/index.php/tor/V2N4_2021

DOI: 10.52957/27821919_2021_4_46



Experimental study product quality in gravity device for mixing bulk materials

I.I. Verloka, A.B. Kapranova, D.V. Stenko, A.E. Lebedev, A.A. Vatagin

Ivan I. Verloka

Department of Theoretical and Applied Mechanics, Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia
E-mail: ivdean@inbox.ru

Anna B. Kapranova

Department of Theoretical and Applied Mechanics, Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia
E-mail: kapranova_anna@mail.ru

Dmitry V. Stenko

Department of Theoretical and Applied Mechanics, Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia
E-mail: dvs3@yandex.ru

Anton E. Lebedev

Department of Technological Machines and Equipment, Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia
E-mail: lebedevae@ystu.ru

Alexander A. Vatagin

Department of Technological Machines and Equipment, Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia
E-mail: vatagerr@bk.ru



The article presents the study results of quality (coefficient of heterogeneity) of obtained dispersed mixtures of hard-to-separate materials of I-III fluidity class by the Kerr method with components ratio 1:10 or more. On laboratory gravitational unit implements a patented three-stage mixing method that adhesion and segregation effects minimizes on homogeneity. The quality indicator was calculated using a contactless method, which is also an object of intellectual property. The feasibility of using the three-stage method in construction and other areas is justified by minimal values of heterogeneity coefficient obtained in experiment ($V_c=6.1\%$) for rational ranges of laboratory mixer controlled parameters. A comparison is made with a more energy-consuming four-stage method of mixing components 1:10 (or more).

Key words: heterogeneity coefficient, mixing, building mixtures, bulk materials, dispersed medium, laboratory unit, three-stage method, four-stage method

For citation:

Verloka I.I., Kapranova A.B., Stenko D.V., Lebedev A.E., Vatagin A.A. Experimental study product quality in gravity device for mixing bulk materials. *Smart Composite in Construction*. 2021. Vol. 2. No 4. P. 46-61 URL: http://comincon.ru/index.php/tor/V2N4_2021

DOI: 10.52957/27821919_2021_4_46



ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в связи с жесткими требованиями к качеству продукции строительной индустрии возникает необходимость поиска новых или совершенствования существующих способов переработки сырьевых материалов. Производство дорожных покрытий, дренажных систем, дисперсно-упрочненных композитов осложнено неравным соотношением компонентов. Качественные сыпучие смеси с соотношением компонентов 1:10 и выше можно получить механическим способом в центробежных аппаратах [1]. Последние наиболее распространены в промышленности, но в основном представляют собой агрегаты периодического действия. Для непрерывного смешивания дисперсных сред I–III класса сыпучести (размеры частиц $(0.15–0.40) \cdot 10^{-3}$ м) предлагается использовать гравитационный трехстадийный порционный метод [2] с принудительным разбрасыванием частиц смешиваемых веществ ротационным щеточным устройством. В рамках проектирования энергоэффективного высокопроизводительного смесительного оборудования, реализующего указанный способ, и верификации математических моделей проведена серия экспериментальных исследований качества (коэффициента неоднородности [3]) получаемой сыпучей продукции. Дополнительно рассмотрена возможность применения агрегатов с большим числом ступеней переработки (четырёхстадийный способ). Анализ полученных результатов посвящена настоящая работа.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для исследований построен аппарат, схематично изображенный на рис. 1. Являясь упрощенной версией трехстадийного смесителя [2], оборудование имеет всего одну ступень переработки, однако позволяет имитировать каждую стадию в отдельности по очереди с постепенным внесением порций большего в соотношении компонента в промежуточную смесь. Таким образом, аппарат, предложенный для непрерывного процесса, работает в периодическом режиме, что допустимо в экспериментальных условиях, но не в производственных.

На цилиндрической поверхности ротационного устройства 7 (смесительного барабана) реализована винтовая навивка (с шагом h_s) резиновых щеток (гибких элементов) 8, спираль которой направлена симметрично относительно его центра (рис. 1, б).

У опытной установки небольшие габариты, высокая виброустойчивость и низкий износ. Лотки 9 и 11, отбойник 10, а также корпус данного аппарата выполнены из лакированной древесно-стружечной плиты, т.к. разрушающее воздействие сыпучих веществ на древесину отсутствует.

Для вращения ротационного устройства 7 использован электропривод, состоящий из двигателя переменного тока мощностью 375 Вт, шкива на подшипниковом валу барабана и ременной передачи. Управление числом оборотов (n , мин⁻¹) электродвигателя реализовано с помощью регулятора TDA1085. Измерение значения параметра n (мин⁻¹) проводилось цифровым лазерным тахометром с помощью светоотражательной ленты, наклеенной на шкиве.

Многостадийный способ получения сыпучих смесей 1:10 и выше основан на принципе наилучшего смешивания равных объемов материалов. Процесс в такой схеме делится на n_τ этапов. На первой стадии исходные компоненты дозируются из бункеров 1–4 в соотношении объемных долей $P_{11} : P_{21}$, рассчитанном по [4], скользят по лотку 9, смешиваются путем разбрасы-



вания частиц гибкими элементами 8 движущегося ротационного устройства 7 и за счет отражения от отбойника 10. Полученная промежуточная смесь на этапах $\tau = 2, \dots, n_\tau$ снова загружается в бункер 1, а в воронку 2 – порция такого же по объему компонента 2 ($P_{2\tau}$). Итоговая смесь 1:10 и выше формируется после стадии $\tau = n_\tau$. Результаты расчета объемных долей для конкретного соотношения 1:10 при трехстадийном и четырехстадийном способах представлены в табл. 1, 2.

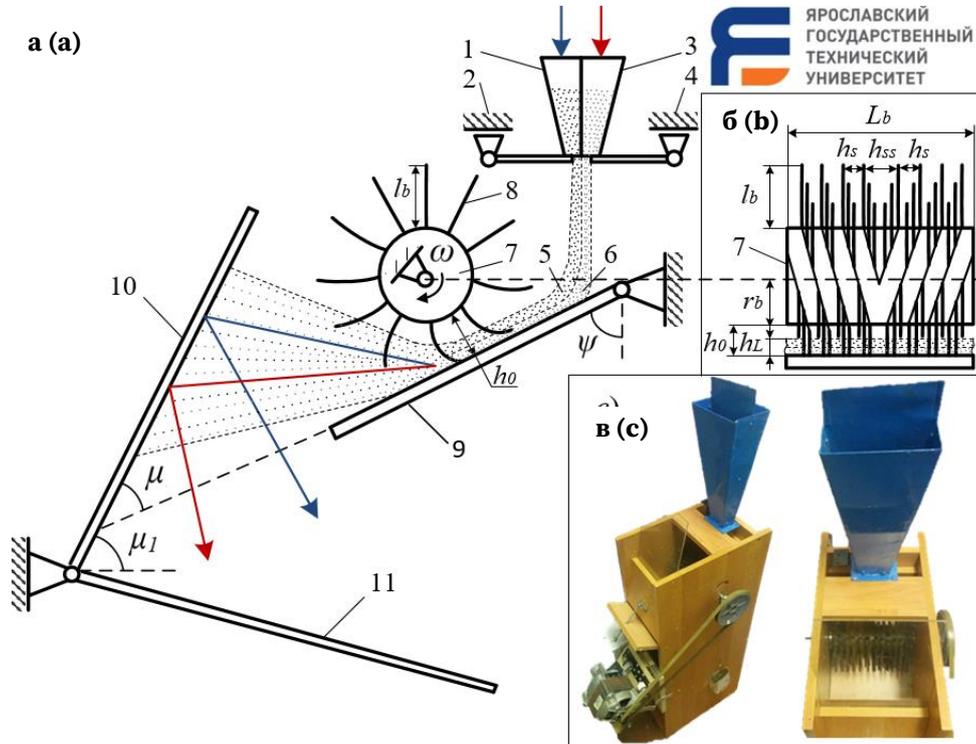


Рис. 1. Принципиальная схема лабораторной смесительной установки в поперечном (а) и продольном (б) сечениях и внешний вид аппарата (в): 1, 2 – бункер и дозатор первого компонента; 3, 4 – бункер и дозатор второго компонента; 5, 6 – слои сыпучих компонентов; 7 – ротационное устройство (смесительный барабан); 8 – гибкий щеточный элемент; 9 – наклонный лоток; 10 – отбойник; 11 – спускной лоток

Fig. 1. Schematic diagram of a laboratory mixing plant in transverse (a) and longitudinal (b) sections and the external view of the apparatus (c): 1, 2 – hopper and dispenser of the first component; 3, 4 – hopper and batcher of the second component; 5, 6 – layers of granular components; 7 – rotary device (mixing drum); 8 – flexible brush element; 9 – inclined tray; 10 – bump; 11 – chute

Табл. 1. Расчетные объемные доли сыпучих компонентов на каждой стадии смешивания при $n_\tau = 4$

Table. 1. Calculated volume fractions of bulk components at each mixing stage at $n_\tau = 4$

Номер стадии	$\tau = 1$		$\tau = 2$		$\tau = 3$		Смесь 1:10
Объемная доля	P_{11}	P_{21}	$P_{11} + P_{21}$	P_{22}	$P_{11} + P_{21} + P_{22}$	P_{23}	$P_{11} + P_{21} + P_{22} + P_{23}$
	1	1.75	2.75	2.75	5.50	5.50	11.00



Табл. 2. Расчетные объемные доли сыпучих компонентов на каждой стадии смешивания при $n_\tau = 3$

Table. 2. Calculated volume fractions of bulk components at each mixing stage at $n_\tau = 3$

Номер стадии	$\tau = 1$		$\tau = 2$		$\tau = 3$		$\tau = 4$		Смесь 1:10
	P_{11}	P_{21}	$P_{11} + P_{21}$	P_{22}	$P_{11} + P_{21} + P_{22}$	P_{23}	$P_{11} + P_{21} + P_{22} + P_{23}$	P_{24}	
Объемная доля	1	0.375	1.375	1.375	2.75	2.75	5.50	5.50	$P_{11} + P_{21} + P_{22} + P_{23} + P_{24}$
									11.00

Задачи опытных исследований:

1) Для трехстадийного способа – получение зависимости коэффициента неоднородности смеси на каждой стадии процесса:

- от угловой скорости вращения ω ротационного устройства 7 (см. рис. 1): $V_c = V_c(\omega)$;
- от величины относительной деформации $\Delta = l_b / h_0$ гибких элементов 8: $V_c = V_c(\Delta)$;
- от угла наклона μ_1 отбойника 10: $V_c = V_c(\mu_1)$.

2) Для четырехстадийного способа – получение зависимости коэффициента неоднородности смеси на каждой стадии процесса:

- от угловой скорости вращения ω ротационного устройства 7 (см. рис. 1): $V_c = V_c(\omega)$.

3) Сравнительный анализ зависимостей $V_c = V_c(\omega)$ для трехстадийного и четырехстадийного методов на каждом этапе процесса.

Для оценки коэффициента неоднородности использован запатентованный контактный способ [5], основанный на цветовом анализе пикселей цифровых изображений проб компонентов и их итоговой (промежуточной) смеси.

Варьирование каждого из конструктивно-режимных параметров (ω , Δ , μ_1) осуществлено при нескольких фиксированных значениях остальных характеристик, в результате чего получен набор опытных значений V_c .

Сыпучие компоненты для экспериментов. В качестве рабочих сред для осуществления процесса на лабораторной смесительной установке использованы предварительно высушенные по методике [6, 7] манная крупа ГОСТ 7022-2019 (компонент «1», $i = 1$) и природный песок ГОСТ 8736-2014 (компонент «2», $i = 2$) – материалы I класса сыпучести согласно классификации Керра [8] со следующими характеристиками:

- угол естественного откоса 25–30°;
- коэффициент вибрационного уплотнения 2–10%;
- угол обрушения 25–31°;
- коэффициентом однородности 1–5%.

Посредством сит ГОСТ 4403-91 (номинальные размеры отверстий $0.35 \cdot 10^{-3}$; $0.5 \cdot 10^{-3}$; $0.67 \cdot 10^{-3}$ м) в соответствии с методом из ГОСТ 8735-88 определены насыпные плотности компонентов $\rho_{H1} = 0.704 \cdot 10^3$ кг/м³ (манная крупа) и $\rho_{H2} = 1.344 \cdot 10^3$ кг/м³ (природный песок), а также granulometric состав:

- манной крупы: 81.0% – фракции с диаметром $d_{11} = (0.35-0.67) \cdot 10^{-3}$ м и 19,0% – $d_{12} = (0.25-0.35) \cdot 10^{-3}$ м;
- природного песка: 40.7% – $d_{21} = (0.50-0.67) \cdot 10^{-3}$ м; 24.0% – $d_{22} = (0.35-0.50) \cdot 10^{-3}$ м и 35.3% – d_{23} до $0.35 \cdot 10^{-3}$ м.



Ударное взаимодействие частиц смешиваемых материалов с отбойной поверхностью 10 (см. рис. 1) характеризуется коэффициентами восстановления $k_{v1} = 0.1587$ (манная крупа) и $k_{v2} = 0.1853$ (природный песок), выявленными экспериментально и рассчитанными по методике, изложенной в работе [9].

Параметры лабораторной смесительной установки на этапе опытных исследований.

Объемный расход подаваемых компонентов смеси задавался открытием заслонок бункеров 1 и 3 и был зафиксирован на значении $Q_V = 8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot \text{ч}^{-1}$.

Конструктивные параметры опытного аппарата:

- длина $L_b = 1.85 \cdot 10^{-1} \text{ м}$ и радиус $r_b = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ ротационного устройства 7;
- длина $l_b = 4.5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ гибких элементов 8;
- шаг навивки $h_s = 1.6 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ гибких элементов 8 на цилиндрическую поверхность ротационного устройства 7;
- расстояние $h_{ss} = 3.2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ между срединными рядами гибких элементов 8, расположенных симметрично относительно середины цилиндрической поверхности ротационного устройства 7;
- угол наклона $\psi = 75^\circ$ (1.31 рад) лотка 9 относительно вертикали.

Данные о диапазонах варьирования конструктивно-режимных параметров для каждой стадии:

1) Угловая скорость вращения $\omega = 45\text{--}50 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$ (частота $n = 430\text{--}477 \text{ мин}^{-1}$), ротационного устройства 7 (см. рис. 1). Для манной крупы ГОСТ 7022-2019 и природного песка ГОСТ 8736-2014 этот диапазон выявлен экспериментально при определении угла разбрасывания.

2) Относительная деформация $\Delta = l_b/h_0 = 1.45\text{--}1.6$ гибких элементов 8 (длиной l_b) в зазоре (высотой h_0) между ротационным устройством 7 (см. рис. 1) и наклонным лотком 9; барабанно-лотковый зазор $h_0 = (2.8\text{--}3.1) \cdot 10^{-2} \text{ м}$.

3) Угол наклона $\mu_1 = 50\text{--}60^\circ$ отбойника 10 (см. рис. 1) относительно горизонтали $0.87\text{--}1.04$ рад.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

1. Трехстадийный способ смешивания.

1.1. Результаты варьирования угловой скорости ω вращения ротационного устройства 7 (см. рис. 1) в виде зависимостей $V_c = V_c(\omega)$ на всех стадиях процесса ($\tau = 1, \tau = 2, \tau = 3$) показаны на рис. 2. Сопоставление $V_c(\omega)$ для каждого Δ на третьем этапе переработки ($\tau = 3$) изображено на рис. 3.

Наиболее качественная смесь согласно опытным данным и регрессионным кривым формируется на третьей стадии ($\tau = 3$) при следующих значениях конструктивно-режимных параметров:

- $\omega = 47 \text{ рад/с}$, $\Delta = 1.45$ при $V_c = 7.2\%$;
- $\omega = 47 \text{ рад/с}$, $\Delta = 1.50$ при $V_c = 6.1\%$;
- $\omega = 45 \text{ рад/с}$, $\Delta = 1.60$ при $V_c = 7.0\%$.

В начале диапазона $\omega = 45\text{--}46 \text{ рад/с}$ лучшее качество продукции обеспечивается наименьшим значением h_0 для барабанно-лоткового зазора ($\Delta = 1.6$). При увеличении угловой скорости ω от $48 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$ и выше – значение коэффициента неоднородности V_c снижается независимо от значения параметра Δ .

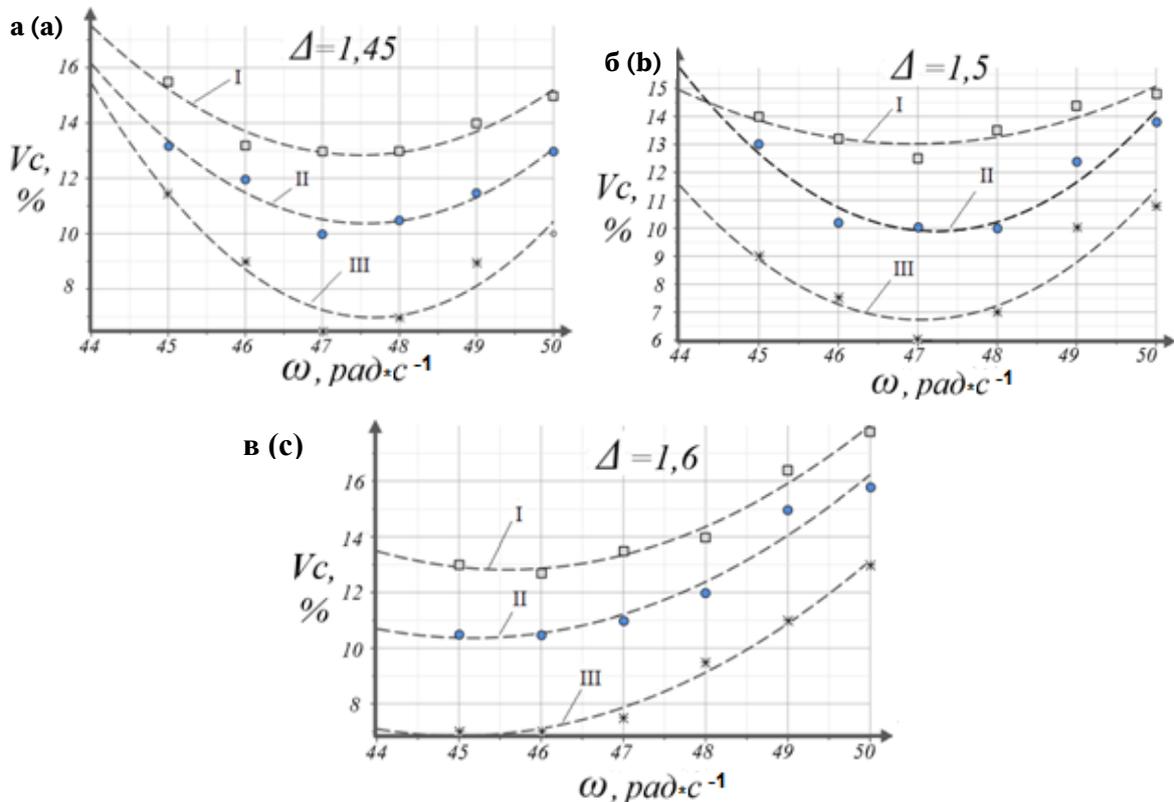


Рис. 2. Зависимость $V_c = V_c(\omega)$ на каждой стадии для смеси манной крупы ГОСТ 7022-2019 и песка ГОСТ 8736-2014 при трехстадийном способе: $\mu_1 = 0.96$ рад; стадия смешивания: I – первая $\tau = 1$; II – вторая $\tau = 2$; III – третья $\tau = 3$; пунктирные линии – регрессионные зависимости, точки – экспериментальные данные;

а – $\Delta = 1.45$; регрессионные зависимости (regression dependences):

$$\text{I} - V_c(\omega) = 871 - 36\omega + 0.38\omega^2; \text{II} - V_c(\omega) = 1040 - 43.3\omega + 0.46\omega^2; \text{III} - V_c(\omega) = 1147 - 60.4\omega + 0.63\omega^2;$$

б – $\Delta = 1.50$; регрессионные зависимости (regression dependences):

$$\text{I} - V_c(\omega) = 501 - 20.8\omega + 0.22\omega^2; \text{II} - V_c(\omega) = 1261 - 53\omega + 0.56\omega^2; \text{III} - V_c(\omega) = 1172 - 50\omega + 0.53\omega^2;$$

в – $\Delta = 1.60$; регрессионные зависимости (regression dependences):

$$\text{I} - V_c(\omega) = 566 - 24\omega + 0.27\omega^2; \text{II} - V_c(\omega) = 520 - 22.5\omega + 0.25\omega^2; \text{III} - V_c(\omega) = 512 - 22.5\omega + 0.25\omega^2$$

Fig. 2. Dependence $V_c = V_c(\omega)$ at each stage for semolina GOST 7022-2019 and sand GOST 8736-2014 mixture with three-stage method: $\mu_1 = 0.96$ rad; mixing stage: I – first $\tau = 1$; II – second $\tau = 2$; III – third $\tau = 1$; dotted lines - regression dependences, points - experimental data;

а – $\Delta = 1.45$; **б** – $\Delta = 1.50$; **с** – $\Delta = 1.60$

1.2. Влияние показателя относительной деформации Δ на качество смеси $V_c = V_c(\Delta)$ на всех стадиях процесса ($\tau = 1, \tau = 2, \tau = 3$) наблюдается на рис. 4. На третьем этапе переработки ($\tau = 3$, рис. 4, в) с ростом значения параметра Δ от 1.45 до 1.60 прослеживается:

- снижение V_c от 11.5 до 6.9% при $\omega = 46$ рад·с⁻¹;
- экстремальное минимальное значение $V_c = 6.1\%$ в точке $\Delta = 1.45$ при $\omega = 47$ рад·с⁻¹;
- возрастание V_c от 6.5 до 9.5% при $\omega = 48$ рад·с⁻¹.



С уменьшением значения h_0 для барабанно-лоткового зазора (ростом Δ) также растет скорость распрямления гибких элементов 8, что приводит:

- к эффективному расширению угла разбрасывания частиц в диапазоне $\omega = 46-47$ рад·с⁻¹;

- к ухудшению качества смеси и падению значения производительности аппарата в связи с ростом сопротивления взаимодействия резиновых щеток 8 с лотком 9 (см. рис. 1).

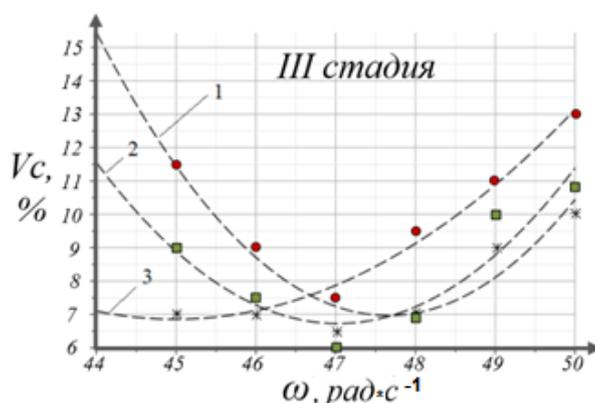


Рис. 3. Зависимость $V_c = V_c(\omega)$ на третьей стадии ($\tau = 3$)

для смеси манной крупы ГОСТ 7022-2019 и песка ГОСТ 8736-2014

при трехстадийном способе: $\mu_1 = 0,96$ рад; 1 – $\Delta = 1.45$; 2 – $\Delta = 1.50$; 3 – $\Delta = 1.60$;

пунктирные линии – регрессионные зависимости, точки – экспериментальные данные;

Fig. 3. Dependence $V_c = V_c(\omega)$ at third stage ($\tau=3$) for semolina GOST 7022-2019 and sand GOST 8736-2014 mixture with three-stage method: $\mu_1 = 0.96$ rad; 1 – $\Delta = 1.45$; 2 – $\Delta = 1.50$; 3 – $\Delta = 1.60$; dotted lines – regression dependences, points – experimental data

1.3. На рис. 5 представлены результаты изменения значения угла наклона μ_1 отбойника 10 (см. рис. 1) в виде зависимостей $V_c = V_c(\mu_1)$ на всех стадиях процесса ($\tau = 1, \tau = 2, \tau = 3$).

Увеличение значения μ_1 от 0.87 до 1.04 рад понижает коэффициент неоднородности смеси (как промежуточной, так и итоговой) независимо от значений конструктивно-режимных параметров (ω, Δ) на каждом этапе переработки ($\tau = 1, \tau = 2, \tau = 3$), однако при более низкой фиксированной угловой скорости $\omega = 46$ рад·с⁻¹ качество продукта становится выше.

2. Сравнение трехстадийного и четырехстадийного способов.

Сопоставление экспериментальных данных двух подходов осуществления процесса в виде зависимостей $V_c = V_c(\omega)$ (опытные точки и регрессионные кривые) представлено на рис. 6.

На первых трех стадиях ($\tau = 1, \tau = 2, \tau = 3$) (см. рис. 6, а-в) минимальное значение коэффициента неоднородности V_c смеси, полученной трехстадийным методом ниже: в 1.08 раз ($\tau = 1$); в 1.07 раз ($\tau = 2$); в 1.05 раз ($\tau = 3$). Однако на четвертом этапе четырехстадийного процесса (см. рис. 6, г) данный показатель ниже примерно в 1.07 раз, чем на выходе эксперимента с трехэтапным способом.

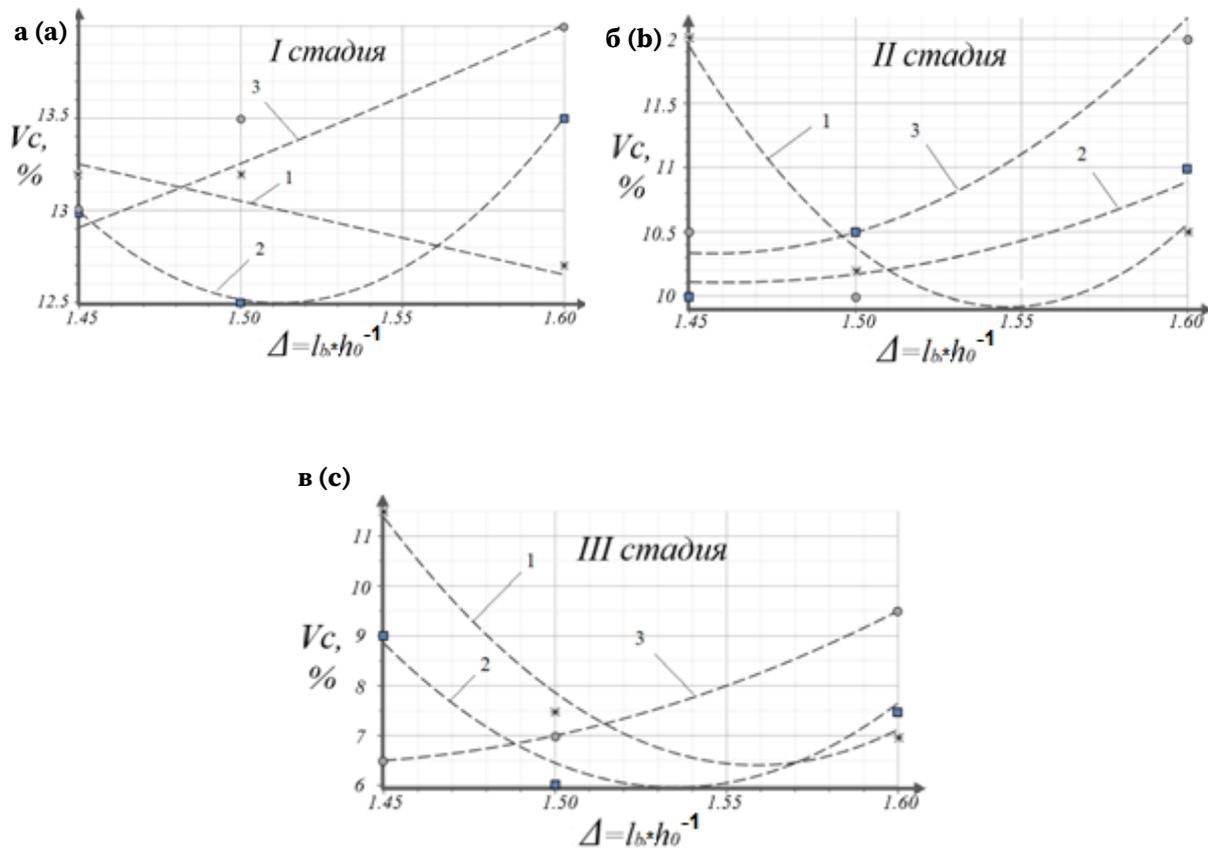


Рис. 4. Зависимость $V_c = V_c(\Delta)$ для смеси манной крупы ГОСТ 7022-2019 и песка ГОСТ 8736-2014 при трехстадийном способе: $\mu_1 = 0.96$ рад; 1 – $\omega = 46$ рад·с⁻¹; 2 – $\omega = 47$ рад·с⁻¹; 3 – $\omega = 48$ рад·с⁻¹; пунктирные линии – регрессионные зависимости, точки – экспериментальные данные;

а – на первой стадии ($\tau = 1$); регрессионные зависимости (regression dependences):

$$1 - V_c(\Delta) = 19 - 4\Delta + 7 \cdot 10^{-13} \Delta^2; 2 - V_c(\Delta) = 309 - 393\Delta + 130\Delta^2; 3 - V_c(\Delta) = 11 - 4.16\Delta + 3.8\Delta^2;$$

б – на второй стадии ($\tau = 2$); регрессионные зависимости (regression dependences):

$$1 - V_c(\Delta) = 536 - 680\Delta + 220\Delta^2; 2 - V_c(\Delta) = 95.3 - 116.7\Delta + 40\Delta^2; 3 - V_c(\Delta) = 201 - 262.2\Delta + 90\Delta^2;$$

в – на третьей стадии ($\tau = 3$); регрессионные зависимости (regression dependences):

$$1 - V_c(\Delta) = 1027 - 1309.4\Delta + 420\Delta^2; 2 - V_c(\Delta) = 948.5 - 1228\Delta + 400\Delta^2;$$

$$3 - V_c(\Delta) = 209.5 - 285\Delta + 100\Delta^2$$

Fig. 4. Dependence $V_c = V_c(\Delta)$ for semolina GOST 7022-2019 and sand GOST 8736-2014 mixture with three-stage method: $\mu_1 = 0.96$ rad; 1 – $\omega = 46$ рад·с⁻¹; 2 – $\omega = 47$ рад·с⁻¹; 3 – $\omega = 48$ рад·с⁻¹;

dotted lines – regression dependences, points – experimental data;

a – at first stage ($\tau = 1$); **b** – at second stage ($\tau = 2$); **c** – at third stage ($\tau = 3$)

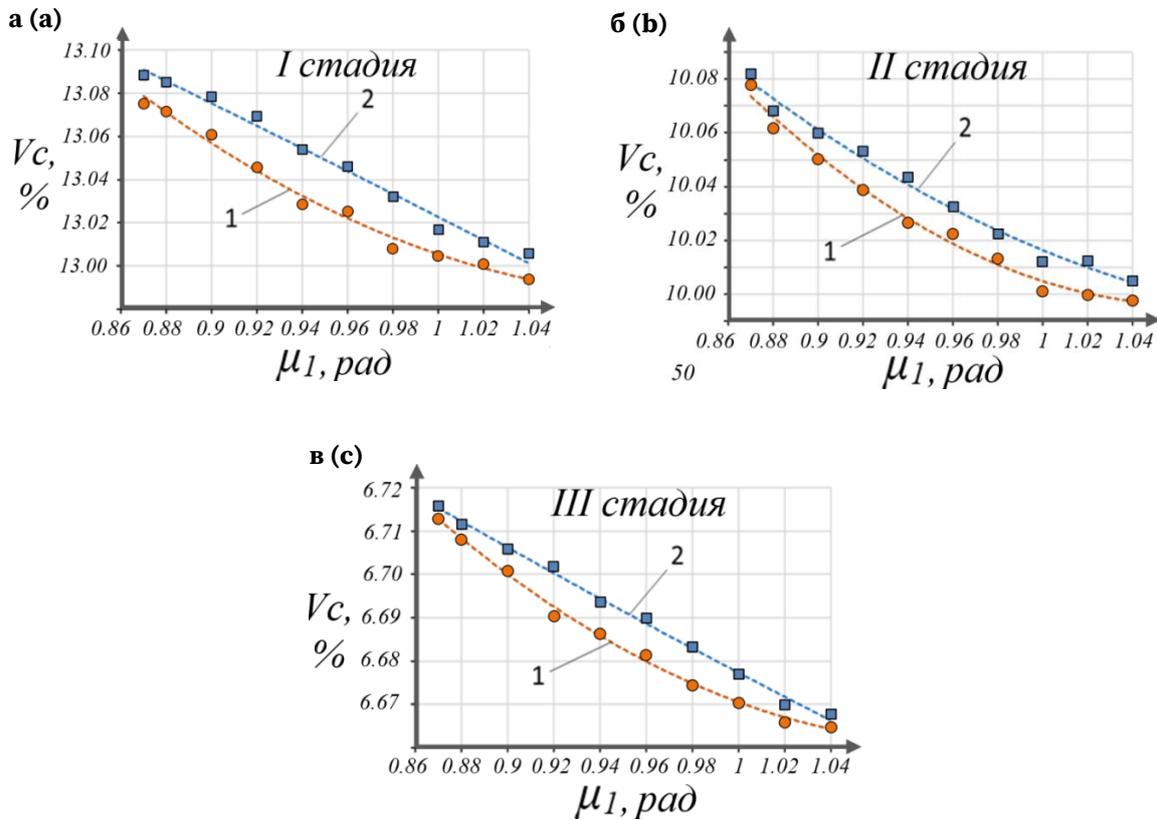


Рис. 5. Зависимость $V_c = V_c(\mu_1)$ для смеси манной крупы ГОСТ 7022-2019 и песка ГОСТ 8736-2014 при трехстадийном способе: $\Delta = 1.50$; стадия трехстадийного способа:

I – первая $\tau = 1$; II – вторая $\tau = 2$; III – третья $\tau = 3$; 1 – $\omega = 46 \text{ рад}\cdot\text{с}^{-1}$; 2 – $\omega = 49 \text{ рад}\cdot\text{с}^{-1}$; пунктирные линии – регрессионные зависимости, точки – экспериментальные данные;

а – на первой стадии ($\tau = 1$); регрессионные зависимости (regression dependences):

$$1 - V_c(\mu_1) = 15 - 3.6\mu_1 + 1.6\mu_1^2; 2 - V_c(\mu_1) = 13.5 - 0.4\mu_1 - 0.07\mu_1^2;$$

б – на второй стадии ($\tau = 2$); регрессионные зависимости (regression dependences):

$$1 - V_c(\mu_1) = 12.3 - 4.3\mu_1 + 2\mu_1^2; 2 - V_c(\mu_1) = 11.4 - 2.47\mu_1 + 1.07\mu_1^2;$$

в – на третьей стадии ($\tau = 3$); регрессионные зависимости (regression dependences):

$$1 - V_c(\mu_1) = 7.9 - 2.2\mu_1 + \mu_1^2; 2 - V_c(\mu_1) = 7.05 - 0.48\mu_1 + 0.1\mu_1^2$$

Fig. 5. Dependence $V_c = V_c(\mu_1)$ for semolina GOST 7022-2019 and sand GOST 8736-2014 mixture with a three-stage method: $\Delta = 1.50$; stage of the three-stage method:

I – first $\tau = 1$; II – second $\tau = 2$; III – third $\tau = 3$; 1 – $\omega = 46 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$; 2 – $\omega = 49 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$;

dotted lines – regression dependences, points – experimental data;

a – at first stage ($\tau = 1$); **b** – at second stage ($\tau = 2$); **c** – at third stage ($\tau = 3$)

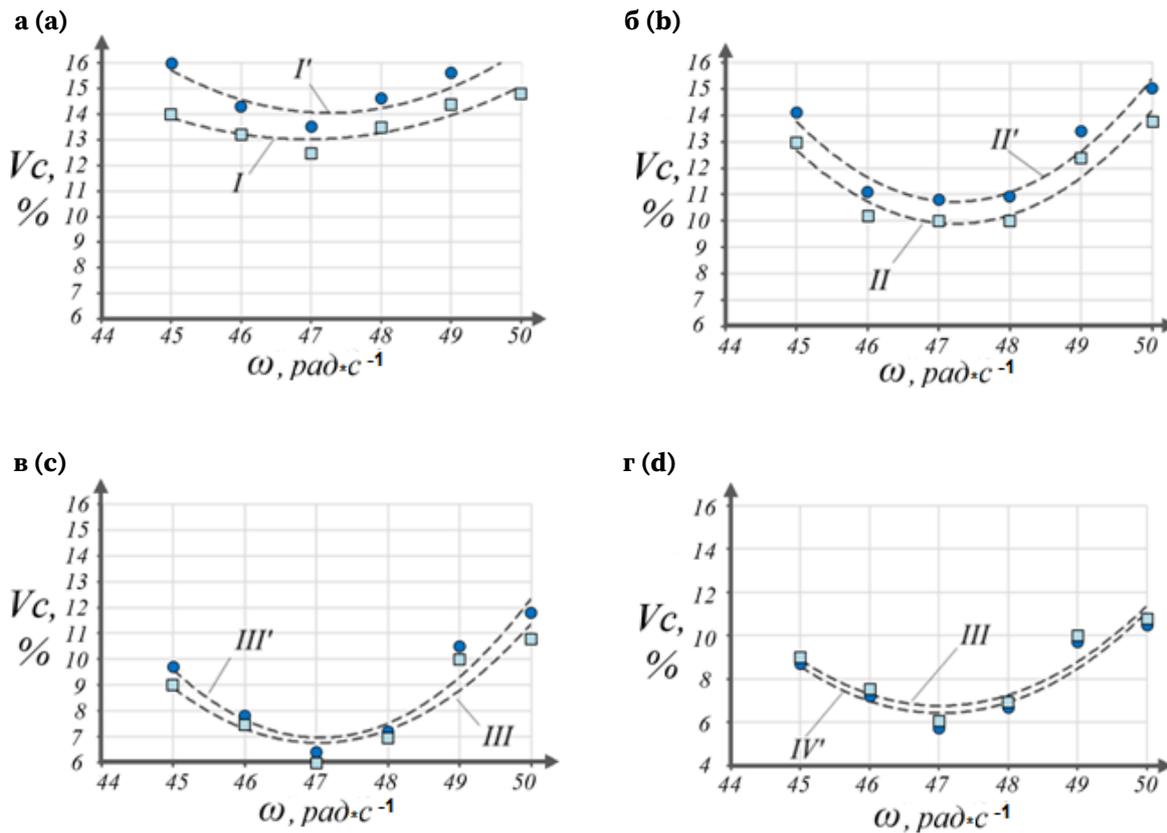


Рис. 6. Зависимость $V_c = V_c(\omega)$ для смеси манной крупы ГОСТ 7022-2019 и песка ГОСТ 8736-2014: $\mu_1 = 0.96$ рад; $\Delta = 1.50$; стадия трехстадийного способа: I – первая $\tau = 1$; II – вторая $\tau = 2$; III – третья $\tau = 3$; стадия четырехстадийного способа: I' – первая $\tau = 1$; II' – вторая $\tau = 2$; III' – третья $\tau = 3$; IV' – четвертая $\tau = 4$; пунктирные линии – регрессионные зависимости, точки – экспериментальные данные; **а** – на первой стадии ($\tau = 1$); регрессионные зависимости (regression dependences):
 $I - V_c(\omega) = 501 - 20.8\omega + 0.22\omega^2$; $I' - V_c(\omega) = 739.9 - 30.7\omega + 0.33\omega^2$;
б – на второй стадии ($\tau = 2$); регрессионные зависимости (regression dependences):
 $II - V_c(\omega) = 1261 - 53\omega + 0.56\omega^2$; $II' - V_c(\omega) = 1373.1 - 57.7\omega + 0.61\omega^2$;
в – на третьей стадии ($\tau = 3$); регрессионные зависимости (regression dependences):
 $III - V_c(\omega) = 1172 - 50\omega + 0.53\omega^2$; $III' - V_c(\omega) = 1382.9 - 58.5\omega + 0.62\omega^2$;
г – на четвертой стадии ($\tau = 4$); регрессионная зависимость (regression dependences):
 $IV' - V_c(\omega) = 1171.4 - 49.5\omega + 0.52\omega^2$

Fig. 6. Dependence $V_c = V_c(\omega)$ for semolina GOST 7022-2019 and sand GOST 8736-2014 mixture: $\mu_1 = 0.96$ rad; $\Delta = 1.50$; stage of the three-stage method: I – first $\tau = 1$; II – second $\tau = 2$; III – third $\tau = 3$; stage of a four-stage method: I' – first $\tau = 1$; II' – second $\tau = 2$; III' – third $\tau = 3$; IV' – fourth $\tau = 4$; dotted lines - regression dependences, points - experimental data; **a** – at first stage ($\tau = 1$); **b** – at second stage ($\tau = 2$); **c** – at third stage ($\tau = 3$); **d** – at the fourth stage ($\tau = 4$)

Учитывая незначительную разницу в значениях V_c , данное обстоятельство позволяет выдать рекомендации по снижению энергетических затрат путем использования меньшего количества ступеней процесса смешивания.



Таким образом, проведенные экспериментальные исследования процесса смешения зернистых компонентов 1:10 на примере манной крупы ГОСТ 7022-2019 и природного песка ГОСТ 8736-2014 позволили выявить целесообразность применения первых трех стадий данной технологической операции без потери качества итогового продукта. В ходе выполнения опытных испытаний лабораторной установки гравитационного смесителя с дополнительными смесительными элементами (гибкими щетками и наклонным отбойником) на каждой стадии осуществления операции смешения установлены параметры, оказывающие наиболее значительное влияние на эффективность работы аппарата. К таким параметрам относятся: относительная деформация гибких элементов Δ , угловая скорость ω вращения ротационного устройства, угол наклона отбойника μ_1 . Для третьей стадии смешения при изменении установленных наиболее значимых факторов (Δ , ω , μ_1) в их выбранных рациональных диапазонах изменения полученные минимальные значения для коэффициента неоднородности имеют пределы 6.0–7.2%. Данный интервал для значений показателя качества готового зернистого продукта не превышает регламентный уровень 7.5%.

ВЫВОДЫ

По результатам экспериментального исследования качества продукции при использовании лабораторного гравитационного аппарата для смешивания сыпучих материалов можно сделать следующие выводы.

1. Доказана эффективность непрерывного смешивания зернистых компонентов с соотношением объемных долей 1:10 и выше в разреженных потоках, формируемых гибкими элементами и отбойником, при транспортировании частиц гравитационным способом. Таким образом, получено перспективное направление для расчета оборудования с высокой производительностью и низкими энергозатратами.

2. Область применения результатов распространяется как на использованные в опытах материалы - песок ГОСТ 8736-2014 и манную крупу ГОСТ 7022-2019, так и на все вещества I-III класса сыпучести по методике Керра, в том числе широкий спектр строительных материалов, необходимых для производства дорожных покрытий, дренажных систем, дисперсно-упрочненных композитов.

3. Выявленные рациональные диапазоны изменения конструктивно-режимных параметров работы описанной лабораторной установки ($\Delta = 1.50$, $n = 450 \text{ мин}^{-1}$ или $\omega = 47 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$, $\mu_1 = 55^\circ = 0.96 \text{ рад}$) способствуют разработке соответствующих рекомендаций при реализации проектирования нового трехстадийного смесительного аппарата непрерывного действия согласно промышленным нуждам.

4. Установлено, что коэффициент неоднородности V_c более зависим от значений относительной деформации гибких элементов Δ и угловой скорости ω вращения ротационного устройства, чем от значения угла наклона отбойника μ_1 в исследуемых пределах варьирования данных параметров. Таким образом, можно рассчитать коэффициенты усиления вышеуказанных управляющих воздействий по отношению к показателю качества на этапе оснащения проектируемого смесительного агрегата системой автоматического управления.

5. Экспериментально подтверждена целесообразность применения трехстадийного способа смешивания по сравнению с четырехстадийным методом вследствие более низкого



энергопотребления (на 25% меньше) в первом подходе и незначительного превосходства по качеству продукции (в 1.07 раз) последнего.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бородулин Д.М.** Повышение эффективности процесса смешивания при получении комбинированных продуктов в смесительных агрегатах центробежного типа: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. 05.18.12. Кемерово. 2013. 38 с.
2. **Зайцев А.И., Лебедев А.Е., Капанова А.Б., Верлока И.И.** Патент РФ № 2586126. Оpubл. 10.06.2016. Бюл. № 16.
3. **Макаров Ю.И.** Аппараты для смешения сыпучих материалов. М.: Машиностроение. 1973. 216 с.
4. **Капанова А.Б., Верлока И.И.** Моделирование критерия качества смеси в объеме барабанно-ленточного устройства. Хим. и нефтегаз. машиностроение. 2018. Т.54. № 5. С. 3-9.
5. **Зайцев А.И., Лебедев А.Е., Капанова А.Б., Верлока И.И., Бадаева Н.В., Ватагин А.А., Лебедев Д.В.** Патент РФ № 2620387. Оpubл. 25.05.2017. Бюл. № 15.
6. **Гячев Л.В.** Движение сыпучих материалов в трубах и бункерах. М.: Mashizd. 1968. 184 с.
7. **Глейзер М.И.** Определение физических характеристик горных пород в макшлейдерско-геологической практике. М.: Недра. 1969. 78 с.
8. **Лукьянов П.И.** Аппараты с движущимся зернистым слоем. Теория и расчет. М.: Химия. 1974. 181 с.
9. **Кузьмин И.О.** Моделирование процесса струйного смешивания сыпучих материалов с последующим уплотнением в новом аппарате с подвижной лентой: автореф. дис. ... канд. техн. наук. 05.17.08. Ярославль. 2009. 16 с.

Поступила в редакцию 29.11.2021

Принята к опубликованию 08.12.2021

REFERENCES

1. **Borodulin D.M.** Increasing the efficiency of mixing in the production of combined products in centrifugal mixing units. Extended Abstract of Doctoral Dissertation. Kemerovo. 2013. 38 p. (in Russian).
2. **Zaytsev A.I., Lebedev A.E., Kapranova A.B., Verloka I.I.** RF Patent N 2586126. Publ. 06.10.2016 (in Russian).
3. **Makarov Yu.I.** Apparatuses for mixing bulk materials. M.: Mashinostroenie. 1973. 216 p. (in Russian).
4. **Kapranova A.B., Bakin M.N., Verloka I.I.** Simulation of the Quality Criterion of a Mixture in a Drum-Belt Apparatus. Chemical and Petroleum Engineering. 2018. V. 54. № 5-6. P. 287-297. DOI: 10.1007/s10556-018-0477-0 (in Russian).
5. **Zaytsev A.I., Lebedev A.E., Kapranova A.B., Verloka I.I. Badaeva N.V., Vatagin A.A., Lebedev D.V.** RF Patent N 2620387. Publ. 25.05.2017 (in Russian).
6. **Gyachev L.V.** Movement of bulk materials in pipes and bins. M.: Mashizd. 1968. 184 p. (in Russian).



7. **Glejzer M.I.** Determination of physical characteristics of rocks in surveying and geological practice. М. : Nedra. 1969. 78 p. (in Russian).
8. **Luk'yanov P.I.** Devices with a moving granular layer. Theory and calculation. М.: Khimiya. 1974. 184 p. (in Russian).
9. **Kuzmin I.O.** Modeling of the process of jet mixing of bulk materials with subsequent compaction in a new apparatus with a moving belt. Extended Abstract of Candidate Dissertation. Yaroslavl. 2009. 16 p. (in Russian).

Received 29.11.2021

Accepted 08.12.2021