

ОПЫТНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ СМЕШИВАНИЯ СЫПУЧИХ СРЕД ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ДИСПЕРСНЫХ ПОТОКОВ

Ватагин А.А., Лебедев А.Е., Мурашов А.А., Орлов Ф.С.

Ватагин Александр Александрович, Лебедев Антон Евгеньевич, Орлов Федор Сергеевич
Ярославский государственный технический университет,
г. Ярославль, Россия, 150023, Ярославская область, г. Ярославль, Московский проспект, д. 88
E-mail: Vatagerr@bk.ru, Lae4444@mail.ru

Мурашов Анатолий Александрович
Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны филиал военно-космической академии
имени А.Ф. Можайского,
г. Ярославль, Россия, 150001, Ярославская область, г. Ярославль, Московский проспект, д. 28
E-mail: alena.severyanka@mail.ru

При проведении процессов смешивания сыпучих сред имеет место появление сегрегации смеси, то есть ее разделение в процессе получения и выгрузки. Существующие методы борьбы с сегрегацией при смешивании направлены на разрушение сегропотоков, на управление сегропотоками, а также на организацию рециклов. В статье представлены результаты опытных исследований процесса смешивания сыпучих материалов, склонных к сегрегации, в новом аппарате. Разработанный аппарат представляет собой подвижную транспортную ленту, над которой размещены разбрасывающие органы, имеющие возможность поворота и отбойный элемент из эластичного материала, который может быть зафиксирован. В качестве модельных материалов были использованы сыпучие среды, частицы которых отличаются по форме, плотности и размерам. Качество полученных смесей, оценивалось с помощью разработанного полубесконтактного способа.

Ключевые слова: смешивание, смеситель, способ, разреженные потоки, разбрасыватель, частицы, плотность, сегрегация.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE PROCESSES OF MIXING POOL MEDIA DURING THE INTERACTION OF DISPERSIVE FLOWS

Vatagin A.A., Lebedev A.E., Murashov A.A., Orlov F.S.

Vatagin Alexander Alexandrovich, Lebedev Anton Evgenievich, Orlov Fedor Sergeevich
Yaroslavl State Technical University,
Yaroslavl, Russia, 150023, Yaroslavl region, Yaroslavl, Moskovsky prospect, 88
E-mail: Vatagerr@bk.ru, Lae4444@mail.ru

Murashov Anatoly Alexandrovich
Yaroslavl Higher Military School of Air Defense, a branch of the A.F. Mozhaisky,
Yaroslavl, Russia, 150001, Yaroslavl region, Yaroslavl, Moskovsky prospect, 28
E-mail: alena.severyanka@mail.ru

When carrying out the processes of mixing bulk media, the segregation of the mixture occurs, that is, its separation in the process of receiving and unloading. The existing methods of combating segregation during mixing are aimed at the destruction of sludge flows, the management of sludge flows, as well as the organization of recycling. The article presents the results of experimental studies of the process of mixing bulk materials prone to segregation in a new apparatus. The developed apparatus is a movable conveyor belt, above which spreading elements are placed that can be rotated and a baffle element made of elastic material that can be fixed. Loose media were used as model materials, the particles of which differ in shape, density and size. The quality of the resulting mixtures was evaluated using the developed semi-contact method.

Keywords: mixing, mixer, method, sparse flows, spreader, particles, density, segregation.

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

В химической и других отраслях промышленности при проведении процессов смешивания сыпучих сред достаточно часто имеет место возникновение нежелательного процесса – сегрегации смеси, то есть ее разделения в процессе получения и выгрузки [1-6]. Основными видами сегрегации являются разделение смешиваемых материалов по плотности (в полях сил тяжести и под действием центробежных сил), разделение за счет различия в размерах и физико-механических свойствах частиц (фрикционных, упругих и других). Установлено, что наиболее интенсивная сегрегация вызвана различием плотностей и размеров частиц смешиваемых материалов. Существующие методы снижения сегрегации позволяют лишь частично снизить ее проявление, но при этом существенно усложняют конструкцию аппарата и увеличивают время переработки. Таким образом, проблема получения однородных смесей материалов, частицы которых отличаются по плотности и размерам, актуальна. С целью предотвращения сегрегации предложено осуществлять процесс смешивания в дисперсном состоянии, организовав при этом раздельное, независимое разбрасывание каждого компонента [1-4].

ЦЕЛЬ ИЗУЧЕНИЯ

Целью изучения является опытное подтверждение возможности получения однородных смесей сыпучих сред, склонных к сегрегации, в

аппарате с подвижной лентой за счет организации независимого формирования потоков смешиваемых компонентов с последующим ударным взаимодействием с эластичным отбойным органом.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В процессе смешивания сыпучих сред, частицы которых отличаются по плотности и размерам, возникает нежелательное явление сегрегации, приводящее к существенному снижению однородности смеси. Для смешения таких материалов разработан смеситель [Пат. 2624698 РФ], в котором смешиваемые компоненты раздельно переводятся в разреженное состояние, а сформированные с требуемыми параметрами потоки, взаимодействуют, при этом формируется однородная смесь. С целью предотвращения разделения смеси и ее сохранения, организуется близкое к неупругому отражение от эластичного отбойного элемента. Такой способ организации процесса смешения практически полностью исключает сегрегацию и способствует получению качественных смесей.

С целью выявления рациональных режимов работы разработанного смесителя были проведены опытные исследования на лабораторной установке, которая показана на рис. 1. Основные технические параметры лабораторной установки представлены в табл. 1. Модель установки в формате 3D приведена на рис.2.

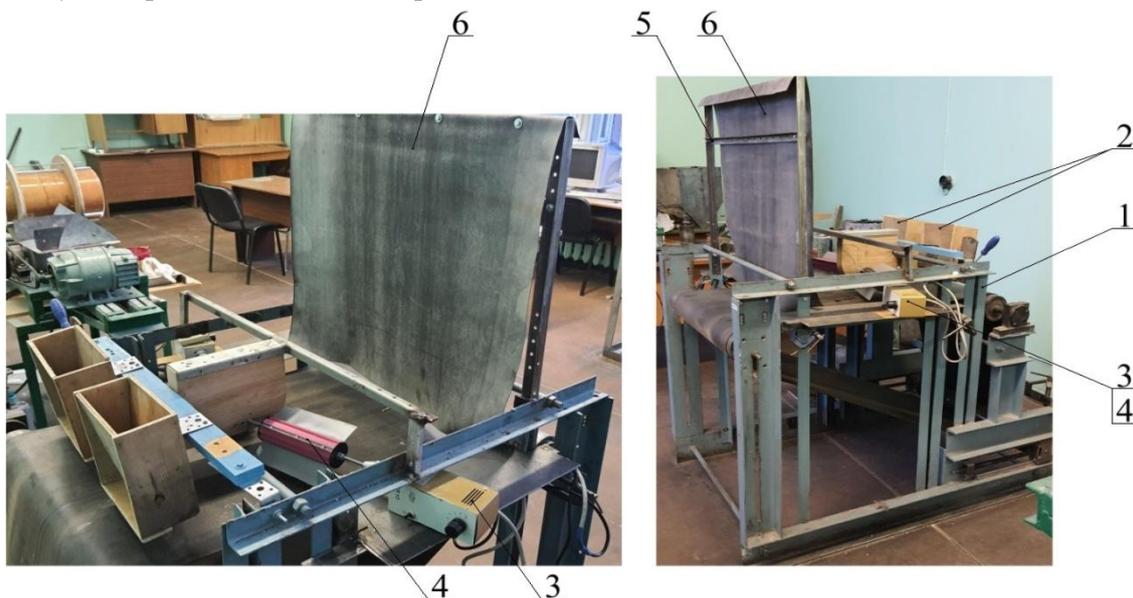


Рис. 1. Лабораторная установка: 1-каркас, 2-бункеры, 3-привод, 4-щеточный разбрасыватель с эластичными лопатками, 5-рамка крепления отбойного элемента, 6-отбойный элемент

Fig. 1. Laboratory installation: 1-frame, 2-bunkers, 3-drive, 4-brush spreader with elastic vanes, 5-fender attachment frame, 6-fender

Технические параметры лабораторной установки
Table 1. Technical parameters of the laboratory setup

№	Наименование	Параметр
1	Габаритные размеры, мм	800x1200x1400 (по рамке)
2	Ширина транспортерной ленты, мм	650
3	Объем бункера, см ³	1000
4	Двигатель: - частота вращения, об/мин. - ток, А - мощность, кВт	П22М (1та424013) 1500 5,54 0,95
5	Привод	ER10 (220В/50Гц/30Вт)
6	Масса установки, кг	100

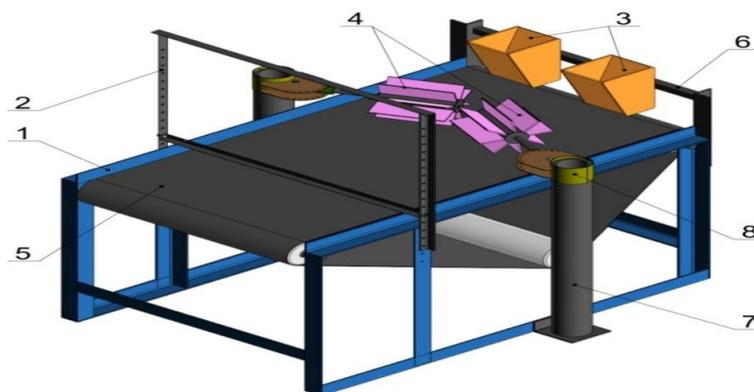


Рис. 2. Модель лабораторной установки в формате 3D: 1-каркас, 2-рамка, 3-бункера, 4-разбрасывательные устройства, 5-транспортная лента, 6-кронштейн, 7-поворотная стойка, 8-привод; Отбойный элемент, закрепленный на рамке 2, условно не показан.

Fig. 2. 3D laboratory setup model: 1-frame, 2-frame, 3-bunkers, 4-spreaders, 5-transport belt, 6-bracket, 7-turn stand, 8-drive; The baffle element fixed on the frame 2 is conventionally not shown.

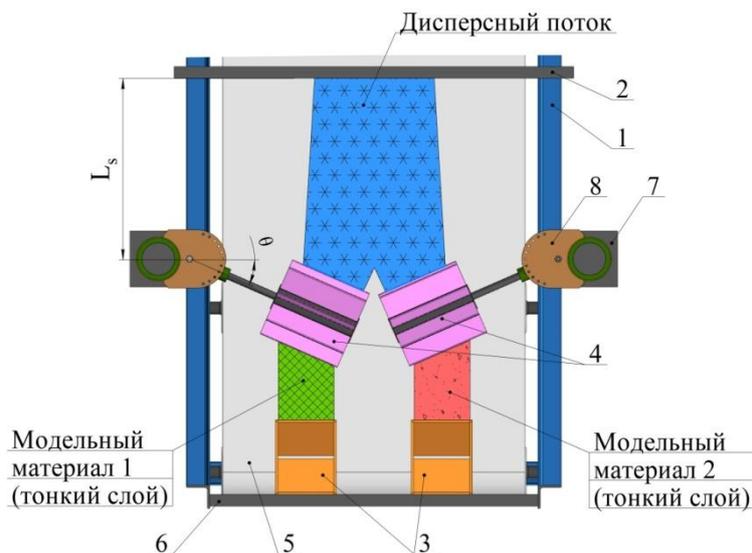


Рис. 3. Схема движения потоков смешиваемых материалов в лабораторной установке: 1-каркас, 2-рамка с отбойным элементом, 3-поворотная стойка, 4-привод, 5-бункеры, 6-щеточные разбрасыватели, 7-транспортерная лента, 8-кронштейн. L_s – регулируемое расстояние установки рамки с отбойником в [мм]; θ – установочный угол рассеивания материалов, град.

Fig. 3. Scheme of the flow of mixed materials in a laboratory installation: 1-frame, 2-frame with baffle elements, 3-turn stand, 4-drive, 5-bunkers, 6-brush spreaders, 7-conveyor belt, 8-bracket. L_s - adjusting distance of the frame with a bump stop in [mm]; θ - installation angle of dispersion of materials, deg.

Схема работы изображена на рис.3. Перед началом проведения экспериментов в бункеры 5 засыпаются модельные сыпучие материалы в определенных пропорциях.

Выставляются углы поворота стойки и привода θ , выбирается определенное расстояние рамки с отбойником L_s , а также устанавливается сам отбойный элемент на рамку.

Модельные материалы высыпаются из бункеров 5 и двигаясь по транспортной ленте 7 (для контраста показана белым цветом), попадают на щеточные разбрасывающие устройства, которые разбрасывают их на отбойный элемент.

В полете происходит их взаимное соударение и как следствие перемешивание, которое заканчивается в зоне отбойного элемента. Таким образом, в зоне отбойного элемента будет, получается некоторое распределение частиц модельных материалов. В начале на модельных материалах были проведены пуско-наладочные работы, в ходе которых были установлены следующие параметры: Частота вращения привода транспортной ленты = 25 ± 5 об/мин;

Частота вращения привода разбрасывающих устройств. Значения имеют пять положений:

- 6 положение = 2100 ± 100 об/мин;
- 6,5 положение = 2300 ± 100 об/мин;
- 7 положение = 2600 ± 100 об/мин;
- 7,5 положение = 3000 ± 100 об/мин;
- 8 положение = 3500 ± 100 об/мин;

Частота вращения валов разбрасывающих устройств и привода транспортной ленты замерялись при помощи тахометра ТЧ-10Р [7].

Модельные материалы:

- перловая крупа ГОСТ 5784-60, $\rho_{пер} = 1100$ кг/м³;
- пшено ГОСТ 572-2016, $\rho_{пш} = 1190$ кг/м³; гречневая -
- крупа ГОСТ Р 55290-2012, $\rho_{гр} = 1300$ кг/м³;
- песок с влажностью $\chi = 15\%$, ГОСТ 8736-2014, $\rho_{пес} = 2400$ кг/м³; песок с влажностью $\chi = 6\%$, ГОСТ 8736-2014, $\rho_{пес} = 2100$ кг/м³;

Количество модельного материала, в объеме 150 грамм, для проведения экспериментов замерялось при помощи мерного стакана;

Параметры фотофиксации:

- Диафрагменное число, $f=8,0$;
- Значение светочувствительности, ISO = 200...320; Выдержка 1/100 с.

Расстояние от щеточных смесителей до отбойного элемента, $L=380 \pm 10$ мм.

Методика проведения экспериментов:

- выбрать пропорции модельных материалов и засыпать их в бункеры;

- установить углы поворота и расстояние до отбойного элемента;

- закрепить заранее выбранный упругий материал в рамку;

- запустить транспортную ленту;

- включить и задать количество оборотов вращения щеточных разбрасывателей;

- открыть шлюз для высыпания модельных материалов;

- после отобрать случайную пробу в готовой смеси и зафиксировать ее с помощью фотофиксации; полученные фотографии загрузить в программу Mixan [8] и зафиксировать результат.

В опытах изменялись следующие параметры: угол поворота стойки, расстояние от щеточных разбрасывателей до рамки с отбойным элементом, частота вращения разбрасывателей.

Ввиду того, что изменяемых параметров достаточно много, с целью сокращения числа опытов использована методика полнофакторного эксперимента (ПФЭ) [9].

Первой фазой процесса смешивания в разработанном аппарате является формирование разреженного потока вращающимися щеточными разбрасывателями. С целью изучения влияния конструктивных и режимных параметров на структуру потоков, распределение объемной плотности частиц, выявление основных параметров процесса, необходимого для описания математической модели, в работе проведен комплекс опытов [1-4]. Схема размещения ловушки для изучения распределения частиц в потоке приведена на рис. 4.

Опыты по изучению распределения частиц проводились на модельной материале – песок с влажностью $\chi = 6\%$ и гречневая крупа. Материал насыпался на транспортную ленту, приводимую в движение электродвигателем через ременную передачу, с которой захватывался вращающимся щеточным разбрасывающим устройством и переводился в разреженное состояние.

Образованный тем самым поток имел расширяющуюся форму факела как по высоте, так и по ширине. Для улавливания частиц в конце транспортной ленты установлена ловушка, состоящая из ячеек наклонной формы, ширина каждой ячейки равна 1 см.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе разбрасывания щеточным разбрасывателем частиц модельного материала, они накапливались в ячейках ловушки.

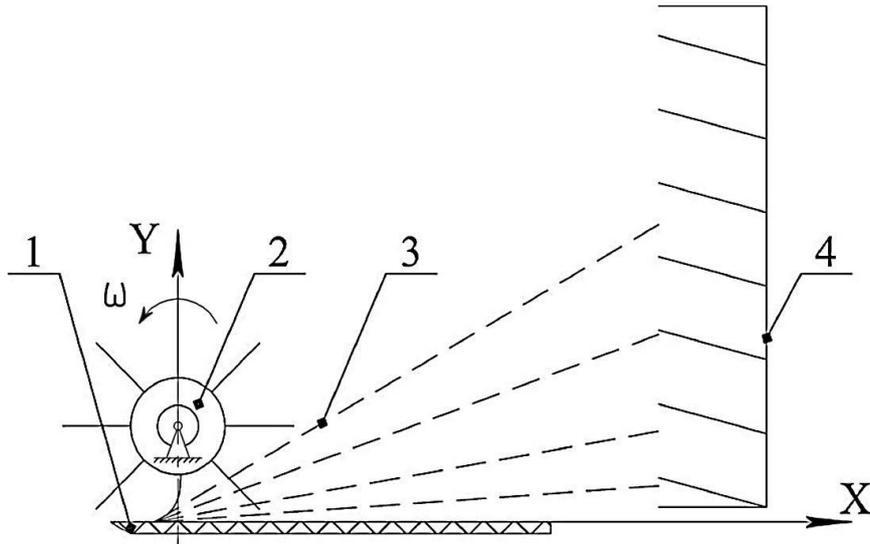


Рис. 4. Схема размещения ловушки для изучения распределения частиц в потоке: 1-транспортная лента, 2-щеточный разбрасыватель, 3-разреженный поток, 4-ловушка.
 Fig. 4. Scheme of trap placement for studying the distribution of particles in a flow: 1-transport belt, 2-brush spreader, 3-rarefied flow, 4-trap

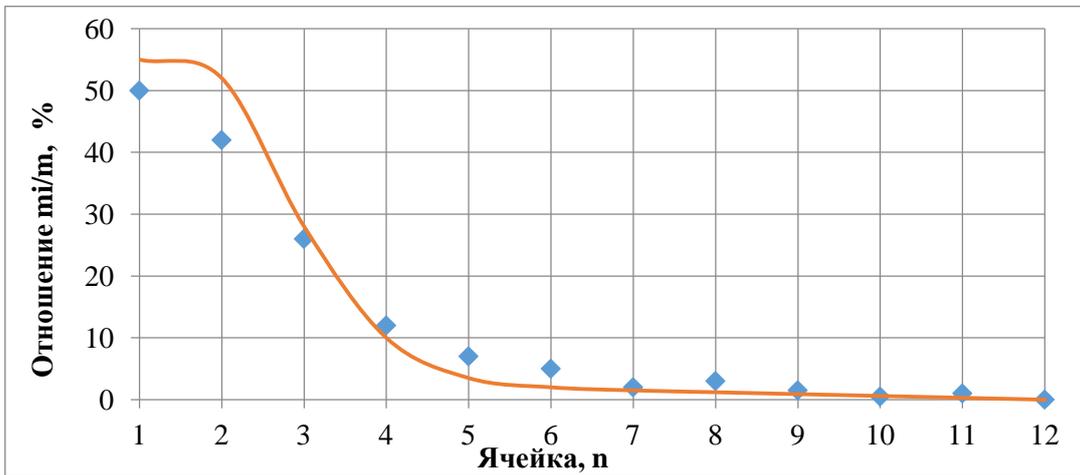


Рис.5. Распределение массы частиц песка при разбрасывании в ячейках ловушки
 Fig.5. Distribution of the mass of sand particles during scattering in the cells of the trap

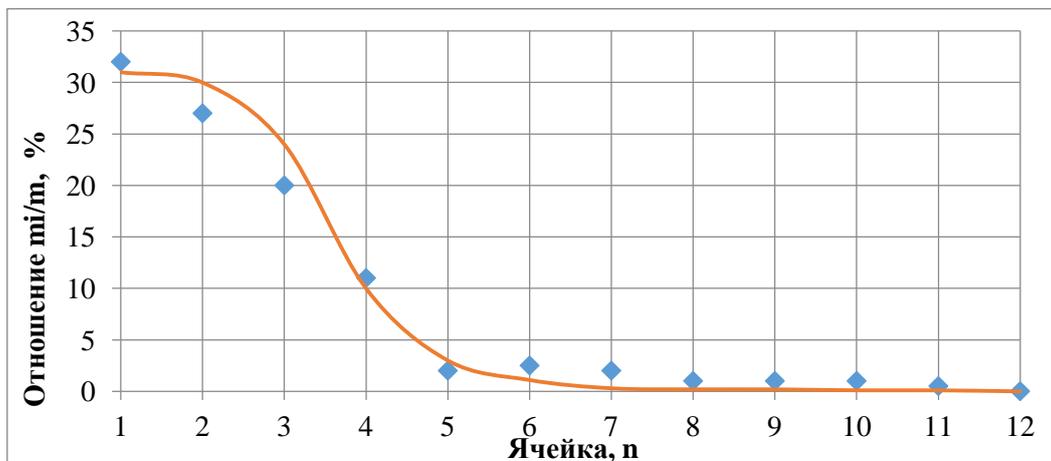


Рис. 6. Распределение массы частиц гречневой крупы при разбрасывании в ячейках ловушки
 Fig. 6. Distribution of the mass of buckwheat particles during scattering in the cells of the trap

Инженерно-технические науки – машиностроение и технологии

При заполнении ячеек опыт прекращался, содержимое каждой ячейки взвешивалось и вычислялось отношение m_i/m , где m_i – масса частиц модельного материала в i -ой ячейке ловушки, m – масса частиц во всех ячейках. По полученным результатам построены графики соответствующих зависимостей, которые изображены на рис. 5 и 6.

Анализируя сравнительные данные, можно сделать вывод о том, что в случае мелкодисперсного материала (песок) теоретическая кривая достаточно точно описывает распределение масс час-

тиц по ячейкам ловушки. Наблюдаемые отклонения теоретической зависимости от опытных точек в первых ячейках вызваны влиянием транспортной ленты на дисперсный поток, ограничивающей его снизу [9-12].

Проведена серия опытов с модельными материалами, склонными к сегрегации: перловая крупа и пшено. Угол установки разбрасывающих устройств принимаем равным 150, частота вращения: 2100 – 3500 об/мин, эластичный отбойный элемент зафиксирован.

Таблица 2

Результаты опытов с модельными материалами: перловая крупа – пшено, n=2100 об/мин
Table 2. Results of experiments with model materials: pearl barley - millet, n=2100 rpm

№	Концентрация первого компонента, C1	Коэффициент неоднородности, Vc
1	0,5154	6,12693
2	0,5361	
3	0,4940	
4	0,5220	
5	0,5412	

Таблица 3

Результаты опытов с модельными материалами: перловая крупа – пшено, n=2300 об/мин.
Table 3. Results of experiments with model materials: pearl barley - millet, n=2300 rpm

№	Концентрация первого компонента, C1	Коэффициент неоднородности, Vc
1	0,5129	10,2164
2	0,5917	
3	0,5386	
4	0,4845	
5	0,4881	

Таблица 4

Результаты опытов с модельными материалами: перловая крупа – пшено, n=2600 об/мин.
Table 4. Results of experiments with model materials: pearl barley - millet, n=2600 rpm

№	Концентрация первого компонента, C1	Коэффициент неоднородности, Vc
1	0,4358	12,4744
2	0,4929	
3	0,4092	
4	0,4440	
5	0,4974	

Таблица 5

Результаты опытов с модельными материалами: перловая крупа – пшено, $n=3000$ об/мин.

Table 5. Results of experiments with model materials: pearl barley - millet, $n=3000$ rpm

№	Концентрация первого компонента, C_1	Коэффициент неоднородности, V_c
1	0,4174	15,0781
2	0,5004	
3	0,4704	
4	0,4984	
5	0,6226	

Таблица 6

Результаты опытов с модельными материалами: перловая крупа – пшено, $n=3500$ об/мин.

Table 6. Results of experiments with model materials: pearl barley - millet, $n=3500$ rpm

№	Концентрация первого компонента, C_1	Коэффициент неоднородности, V_c
1	0,4629	9,7954
2	0,4190	
3	0,5007	
4	0,5067	
5	0,4599	

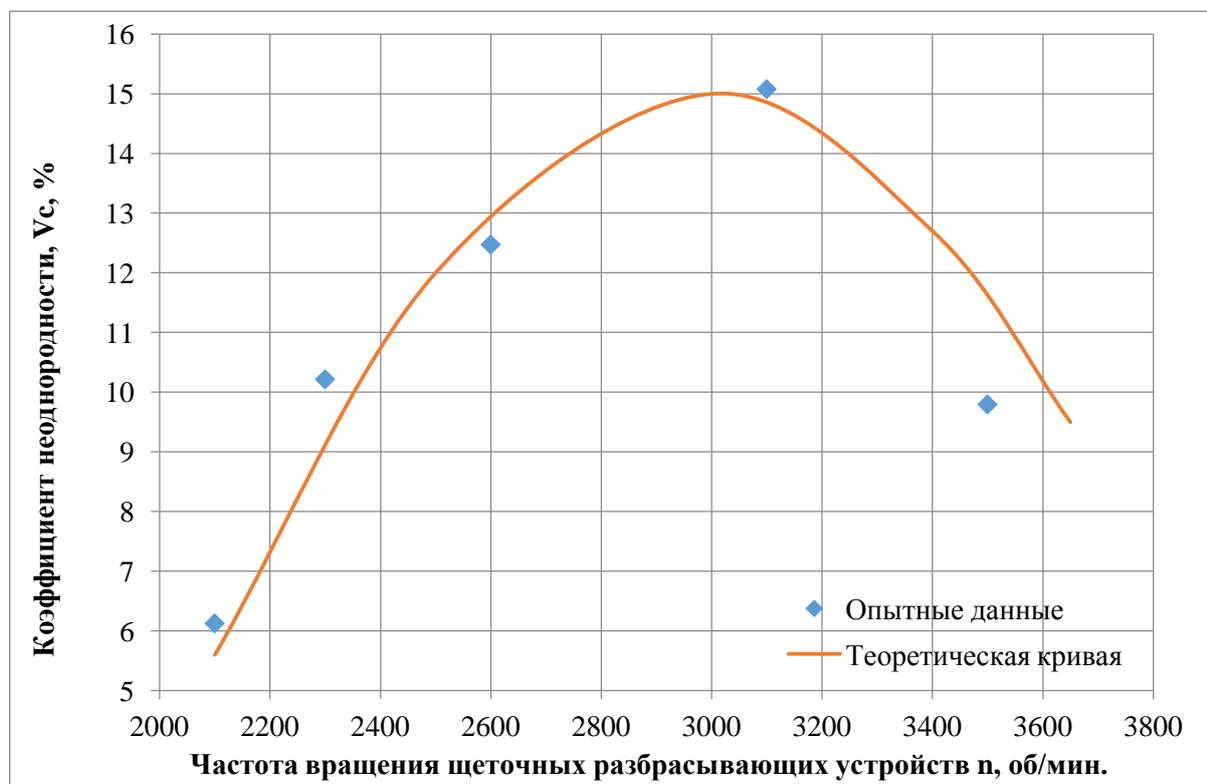


Рис.7. Зависимость V_c от n , перловая крупа – пшено, 150, с фиксацией отбойного элемента
Fig.7. Dependence of V_c on n , pearl barley - millet, 150, with fixation of the baffle element

Коэффициент неоднородности [1-3, 9] смеси оценивали с использованием разработанного метода [Пат. 2620387 РФ]. Результаты приведены в табл. 2 – 6. На рис. 7, по данным табл. 2 – 6, изображена зависимость коэффициента неоднородности от частоты вращения щеточных разбрасывателей. Здесь точками показаны опытные данные, сплошной линией регрессионная кривая.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана конструкция смесителя сыпучих сред со щеточными разбрасывающими органами и подвижной транспортной лентой, эластичным экраном, позволяющая эффективно смешивать компоненты, склонные к сегрегации.

Проведен цикл опытов по разбрасыванию сыпучих материалов вращающимися щеточными

разбрасывателями. Получены опытные данные по распределению массы частиц материалов по углам рассеивания. Установлено, что на параметры распределения наибольшее влияние оказывают частота вращения разбрасывателя, а также размеры и форма частиц.

Полученные результаты работы могут быть рекомендованы для разработки и модернизации смесительного оборудования, работающего со склонными к сегрегации материалами в химической и других отраслях промышленности.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Зайцев А.И., Бытев Д.О.** Ударные процессы в дисперсно-пленочных системах. М.: Химия, 1994. 176 с.
2. **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: монография. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2011. 100 с.
3. **Зайцев А.И., Таршиш М.Ю., Капранова А.Б., Лебедев А.Е.** Анализ современного состояния и направления совершенствования процессов с дисперсными системами. Нестационарные, энерго- и ресурсосберегающие процессы и оборудование в химической, нано- и биотехнологии - НЭРПО-2013: Материалы 3-й Междунар. науч.-техн. конф. Москва, Изд. МГОУ, 2013. С. 207-210.
4. **Васин В.М.** Способ приготовления однородных смесей сыпучих материалов. *Автоматизация и современные технологии*. 2003. № 3. С. 21-24.
5. **Колобов М.Ю., Сахаров С.Е., Чагин О.В., Абаляхин А.М., Колобова В.В.** Технические средства для приготовления смесей зерновых компонентов комбикормов. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2021. № 2(66). С. 108-117.
6. **Блиничев В.Н., Лабутин А.Н., Зуева Г.А., Колобов М.Ю., Алексеев Е.А., Волкова Г.В., Воробьев С.В., Козлов А.М., Кокурина Г.Н., Лысова М.А., Миронов Е.В., Натареев С.В., Невиницын В.Ю., Пономарева Ю.Н., Постникова И.В., Сахаров С.Е., Чагин О.В.** Проблемы разработки энерго- и ресурсосберегающих процессов, реакторных систем и оборудования интенсивного действия, моделирования и оптимального управления. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 7. С. 185–202. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6845j.
7. Тахометр часового типа ТЧ-10Р. <https://td-avtomatika.ru>.
8. Программный продукт «Mixan». <https://sourceforge.net>.
9. **Радченко С.Г.** Устойчивые методы оценивания статистических моделей: Монография. Киев: ПП Санспарель, 2010.
10. **Лебедев А.Е., Зайцев А.И., Капранова А.Б., Ватагин А.А., Сунд С.** Аппараты для переработки дисперсных сред. Теория и расчет. Монография. Ярославль: Издат. дом ЯГТУ, 2018. 132 с. ISBN 978-5-9914-0737-3.

REFERENECES

1. **Zaitsev A.I., Bytev D.O.** Shock processes in dispersed film systems. M.: Chemistry, 1994. 176 p.
2. **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: Publishing House of YaGTU, 2011. 100 p.
3. **Zaitsev A.I., Tarshis M.Yu., Kapranova A.B., Lebedev A.E.** Analysis of the current state and direction of improvement of processes with disperse systems. Non-stationary, energy- and resource-saving processes and equipment in chemical, nano- and biotechnology - NERPO-2013: Proceedings of the 3rd Intern. sci.-tech. conf. Moscow, Ed. MGOU, 2013. P. 207-210.
4. **Vasin V.M.** The method of preparation of homogeneous mixtures of bulk materials. *Automation and modern technologies*. 2003. N 3. P. 21-24.
5. **Kolobov M.Yu., Sakharov S.E., Chagin O.V., Abalikhin A.M., Kolobova V.V.** Technical means for the preparation of mixtures of grain components of animal feed. *Modern science-intensive technologies. Regional application*. 2021. N 2(66). P. 108-117.
6. **Blinichev V.N., Labutin A.N., Zueva G.A., Kolobov M.Yu., Alekseev E.A., Volkova G.V., Vorobyov S.V., Kozlov A.M., Kokurina G.N., Lysova M.A., Mironov E.V., Natareev S.V., Nevinityn V.Yu., Ponomareva Yu.N., Postnikova I.V., Sakharov S.E., Chagin O.V.** Problems of the development of energy- and resource-saving processes, reactor systems and equipment of intense action, modeling and optimal management. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 7. P. 185–202. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6845j.
7. Clock type tachometer TC-10R. <https://td-avtomatika.ru>.
8. Software product «Mixan». <https://sourceforge.net>.
9. **Radchenko S.G.** Sustainable Methods for Estimating Statistical Models: Monograph. Kyiv: PP Sansparel, 2010.504 p.
10. **Lebedev A.E., Zaitsev A.I., Kapranova A.B., Vatagin A.A., Suid S.** Apparatus for the processing of dispersed media. Theory and calculation. Monograph. Yaroslavl: Publishing house. house of YaGTU, 2018. 132 p. ISBN 978-5-9914-0737-3.

11. **Лебедев А.Е., Ватагин А.А.** Новые методы снижения сегрегации сыпучих сред при смешении. Современные задачи инженерных наук. МНТФ Косыгин-2017: сб. научн. трудов VI-й Междунар. науч.-техн. конф. М.: Изд-во ФГБОУ ВО «РГУ им. А. Н. Косыгина». 2017. Том 3. С. 436-438.
12. **Лебедев А.Е., Ватагин А.А., Лебедев Д.В., Гуданов И.С.** Математическое описание процесса распыла компонентов смеси в центробежном аппарате. *Вестник Тамб. гос.техн. ун-та*. 2020. Том 26. N 1. С. 100-105. ISSN 0136-5835. DOI: 10.17277.
11. **Lebedev A.E., Vatagin A.A.** New methods for reducing the segregation of loose media during mixing. Modern tasks of engineering sciences - ISTF Kosygin-2017: coll. scientific Proceedings of the VI-th Intern. sci.-tech. conf. M.: Publishing house of FGBOU VO "RSU im. A. N. Kosygin. 2017. Volume 3. P. 436-438.
12. **Lebedev A.E., Vatagin A.A., Lebedev D.V., Gudanov I.S.** Mathematical description of the process of spraying mixture components in a centrifugal apparatus. *Vestnik Tamb. state technical university*. 2020. Volume 26. N 1. P. 100-105. ISSN 0136-5835. DOI: 10.17277.

Поступила в редакцию 02.06.2023
Принята к опубликованию 17.07.2023

Received 02.06.2023
Accepted 17.07.2023