

Научная статья

УДК 631.363.7.681.332.6

doi: 10.34655/bgsha.2025.80.3.014

Оптимизация конструктивно-режимных параметров центробежного смесителя сухих сыпучих компонентов

А.В. Семенов¹, В.В. Матюшев², И.А. Чаплыгина³, Д.В. Карабухин⁴

^{1,2,3,4}Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия

¹semenov02101960@gmail.com

²don.matyusheff2015@yandex.ru

³ledum_palustre@mail.ru

⁴karabuhindmityr@yandex.ru

Аннотация. Одной из важных операций в технологическом процессе подготовки кормов к вскармливанию является их смешивание. Эффективность процесса смешивания оценивается однородностью полученной смеси, затратами энергии на единицу продукции, производительностью устройства. Ряд авторов отмечают, что добиться однородности смеси при смешивании сухих сыпучих компонентов труднее, чем влажных, особенно при большой разнице компонентного состава. Для решения данной задачи в Инжиниринговом центре Красноярского ГАУ разработан, запатентован, изготовлен опытный образец и проведены экспериментальные исследования смесителя центробежного действия для смешивания сухих сыпучих компонентов комбинированных кормов. Целью исследования является оптимизация процесса смешивания для достижения высокой однородности кормовой смеси при низких энергетических затратах. Задача исследования – провести многофакторный эксперимент, направленный на определение влияния конструктивно-режимных параметров центробежного смесителя на качественные показатели смеси и энергоёмкость процесса. В качестве смешиваемых компонентов взяты зерна пшеницы и пшённой крупы в соотношении 19:1. Основываясь на результатах ранее проведённых исследований, определены значимые для процесса смешивания на смесителе центробежного типа факторы и уровни их варьирования: частота вращения рабочего стола; шаг и угол установки завихрителей потока на наклонной спирали. За показатель качества полученной кормовой смеси принят коэффициент ее неоднородности, энергетические показатели работы оценивались затратами энергии на процессе смешивания. В результате реализации многофакторных экспериментальных исследований определены оптимальные значения факторов в исследуемом диапазоне: частота вращения рабочего стола $n=350$ об/мин; шаг установки завихрителей потока на наклонной спирали $L=500$ мм; угол их установки $\alpha=30^\circ$ относительно касательной верхней кромки спирали. Эти параметры факторов соответствуют минимальным значениям неоднородности смеси $V_c=2,5\%$ и энергоёмкости процесса смешивания $E=1,65$ кВтч/т.

Ключевые слова: центробежный смеситель, оптимизация, однородность смеси, энергетические затраты, эксперимент, наклонная спираль, завихрители потока.

Original article

Optimization of structural and operating parameters of the centrifugal mixer of dry bulky components

Alexander V. Semenov¹, Vasily V. Matyushev², Irina A. Chaplygina³,
Dmitry V. Karabukhin⁴

^{1,2,3,4}Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia

¹semenov02101960@gmail.com

²don.matyusheff2015@yandex.ru

³ledum_palustre@mail.ru

⁴karabuhindmitry@yandex.ru

Abstract. One of the important operations in the technological process of preparing feeds is their mixing. The efficiency of the mixing process is assessed by the level of homogeneity of the resulting mixture, energy consumption per unit of production, and performance of a device. A number of authors point that it is more difficult to achieve homogeneity when mixing dry bulky components than the wet ones, especially with a large difference in the component composition. To solve this problem, the Engineering Center of the Krasnoyarsk State Agrarian University has developed, patented, manufactured a prototype and conducted experimental studies of a centrifugal mixer for mixing dry bulky components of combined feeds. The purpose of the study is to optimize the mixing process achieving high homogeneity of the feed mixture under low energy costs. The purpose of the study is to conduct a multifactorial experiment aimed at determining the effect of the structural and operating parameters of a centrifugal mixer on the quality of the mixture and the energy intensity of the process. Wheat grains and millet groats in a ratio of 19:1 were taken as the mixed components. Based on the results of earlier studies, the factors significant for the mixing process on a centrifugal mixer and their levels of variation were determined: rate of rotation of the working table; the pitch and angle of installation of the flow swirlers on an inclined spiral. The coefficient of its heterogeneity was taken as a quality parameter of the resulting feed mixture, the energy performance was estimated by the energy consumption during the mixing process. As a result of the conducting of multifactorial experimental studies, the optimal values of the factors in the studied range were determined: the rotation rate of the working table $n = 350$ rpm; the installation pitch of the flow swirlers on the inclined spiral $L = 500$ mm; the angle of their installation $\beta = 30^\circ$ relative to the tangent of the upper edge of the spiral. These parameters of the factors correspond to the minimum values of the heterogeneity of the mixture $V_c = 2.5\%$ and the energy intensity of the mixing process $E = 1.65$ kWh/t.

Keywords: centrifugal mixer, optimization, mixture homogeneity, energy costs, experiment, inclined spiral, flow swirlers.

Введение. Концепция государственной политики в области АПК предусматривает увеличение производства продукции животноводства и птицеводства, обладающей высокими качественными показателями, являющейся экономически доступной для потребителя. Большую часть производственных издержек на получение данной продукции приходится на кормление животных и птицы. Наибольшей эффективности в животноводстве и птицеводстве можно достичь за счет максимально сбалансированного по питательным веществам рациона [1].

Вместе с тем, используя одни и те же корма в равных количествах, но применяя разные технологии приготовления, можно получить различную продуктивность [2].

Базовыми операциями в процессе подготовки кормов к вскармливанию является очистка и измельчения компонентов (при необходимости), дозирование, смешивание и хранение готового продукта [3]. Все перечисленные операции имеют важное значение в процессе приготовления корма, но основным показателем, характеризующим качество, является

равномерное распределение всех компонентов по объему кормовой смеси [4, 5, 6].

Качество работы любого устройства для смешивания материалов оценивается по его производительности, расходу энергии на технологический процесс и однородности продукта, полученного на выходе из устройства [7, 8, 9] или его обратной величины – коэффициента неоднородности смешивания [10].

Выбор типа смесителя зависит от физико-механических свойств смешанных компонентов, количественного соотношения в смеси и других характеристик [11]. Кроме того, добиться равномерного распределения компонентов сухой смеси и избежать их сегрегацию гораздо сложнее, чем при смешивании влажных смесей. Для смешивания сухих компонентов смеси, имеющих различные размеры, массу, концентрацию, хорошо подходят смесители центробежного типа, в которых процесс смешивания происходит в движущихся разряженных и тонких слоях. Таким образом, разработка смесителя центробежного типа, позволяющего получить кормовую смесь требуемого качества, является актуальной задачей [12, 13, 14].

Целью исследования является оптимизация конструктивно-режимных параметров центробежного смесителя для повышения качества приготовления кормовых сыпучих смесей.

Задача исследования – определить влияние конструктивно-режимных параметров центробежного смесителя на качество смеси и энергоемкость процесса.

Объект и методы исследования. Объектом исследования является технологический процесс смешивания сыпучих компонентов кормов в смесителе центробежного действия. Предмет исследования – закономерности процесса смешивания сыпучих компонентов кормов в зависимости от конструктивно-режимных параметров работы центробежного смесителя.

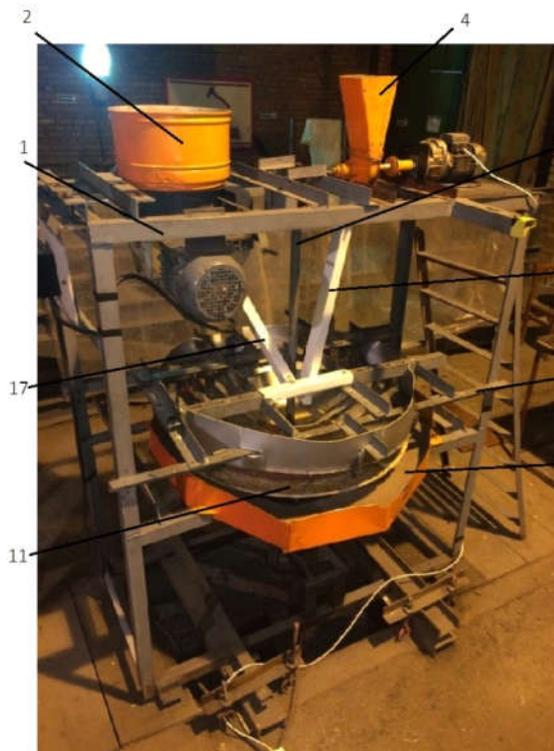
Экспериментальные исследования проводились в Инжиниринговом центре Красноярского ГАУ на разработанном и запатентованном смесителе сыпучих компонентов центробежного действия [15].

На рисунке 1а показан общий вид смесителя сыпучих компонентов центробежного действия, 1б – конструктивно-технологическая схема, 1в – общий вид наклонной спирали с завихрителем потока, 1г – схема потоков смешиваемых компонентов.

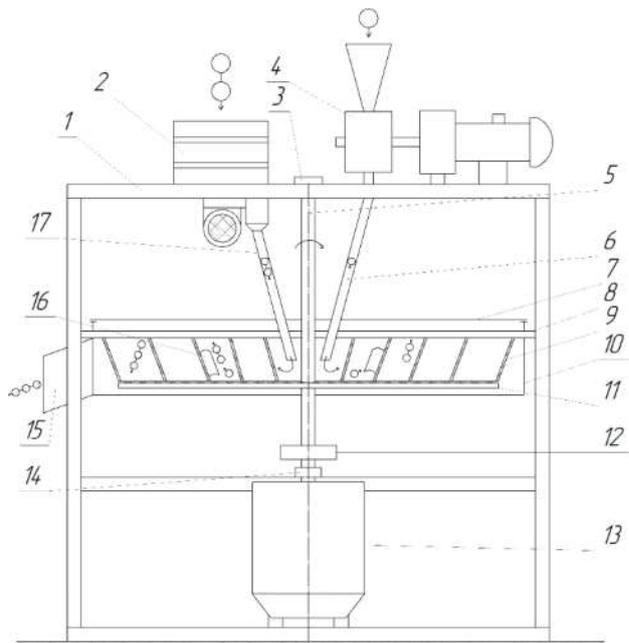
Смеситель состоит из рамы 1, корпуса 10, закрытого крышкой 7, внутри которого на кронштейнах 8 установлена неподвижная наклонная спираль 9 с завихрителями потока 16. В нижней части корпуса под спиралью установлен на вращающемся в подшипниковых опорах 3 и 14 валу 5 стол с шероховатой поверхностью 11. Вращение на вал передается от электрического двигателя 13 через муфту 12. На верхней части рамы установлены дозаторы 2 и 4, из которых через патрубки 6 и 17 компоненты для смешивания подаются в центр вращающегося стола с шероховатой поверхностью. Для вывода полученной смеси из корпуса имеется выгрузной патрубков 15.

Смеситель работает следующим образом. Компоненты для смешивания загружаются в дозаторы 2 и 4. В соответствии с необходимым соотношением компонентов по патрубкам 6 и 17 они подаются в центр вращающегося стола с шероховатой поверхностью 11. Под действием центробежной силы компоненты начинают движение с ускорением по каналу, образуемому спиралью от центра к периферии. Во время движения часть компонентов поступает на внутреннюю часть завихрителей потока 16, в результате чего им придается турбулентное движение, другая часть, переходя через верхнее основание спирали, поступает на следующий виток, где встречается с опережающим потоком компонентов. Наличие турбулизации компонентов и движение их с различными скоростями способствуют высокому качеству смешивания. Полученная смесь выводится из смесительной камеры через выгрузной патрубков 15.

Во время проведения экспериментальных исследований частоту вращения стола с шероховатой поверхностью изменяли с помощью преобразователя частоты электрического тока FR-E540-0,4K-



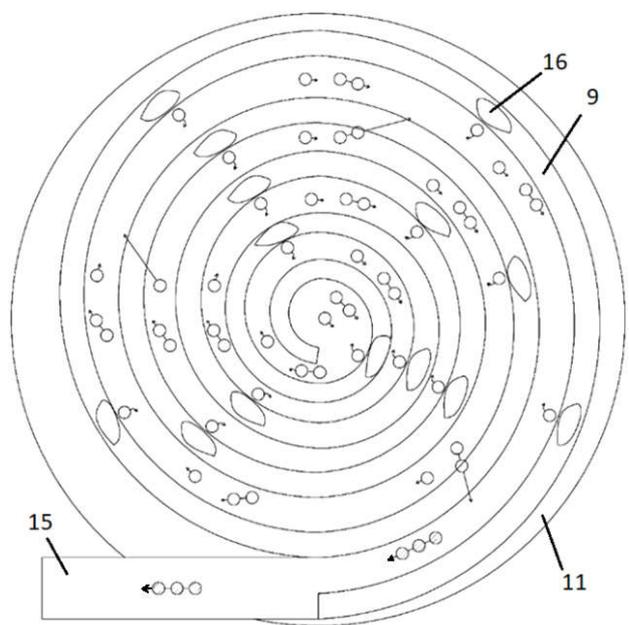
а



б

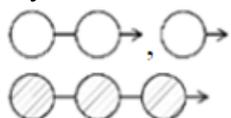


в



г

Рисунок 1. Смеситель сыпучих компонентов центробежного действия



смешиваемые компоненты

смесь компонентов

7,5К(ЕС). Контроль частоты вращения осуществлялся с помощью электронного тахометра. Расход электрической энергии на процесс смешивания осуществлялся измерительным комплектом К-50. Качество смеси оценивали с помощью коэффициента неоднородности смешивания [10]. Значение основного компонента в пробе определяли с помощью ситового сепаратора.

Результаты исследований и обсуждение. В ходе проведенных экспериментальных исследований варьировались следующие факторы: частота вращения стола с шероховатой поверхнос-

тью n (об/мин); шаг установки завихрителей потока на спирали L (мм); угол установки завихрителей потока относительно касательной верхней кромки спирали α (град). За критерий оптимизации принят коэффициент неоднородности смеси V_c (%) и затраты энергии на процесс смешивания E (кВтч/т). Проводили смешивание зерен пшеницы и пшенной крупы в соотношении 95:5% в трехкратной повторности. Значения факторов и интервалов варьирования были приняты, руководствуясь результатами проведенных ранее однофакторных экспериментов [16, 17], и приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Факторы и уровни варьирования

Фактор и его обозначение	Нижний уровень	Центр плана	Верхний уровень	Интервал варьирования
Частота вращения стола с шероховатой поверхностью, n	350	400	450	50
Шаг установки завихрителей потока на спирали, L	500	600	700	100
Угол установки завихрителей потока на спирали, α	30	45	60	15

Согласно матрице плана проведения эксперимента устанавливались соответствующие режимные и конструктивные параметры.

После выхода смесители на установившийся режим работы производили отбор проб в трехкратной повторности. Для каждого эксперимента фиксировали затраты энергии на процесс смешивания.

Результаты полученных эксперимен-

тальных данных обрабатывались с помощью математического программного обеспечения Maple, в результате чего получены уравнения регрессии и поверхности отклика, показывающие влияние факторов n , L , α на критерии оптимизации V_c и E .

Зависимость E от n и α описывается уравнением регрессии (1), E от n и L (2), E от L и α (3):

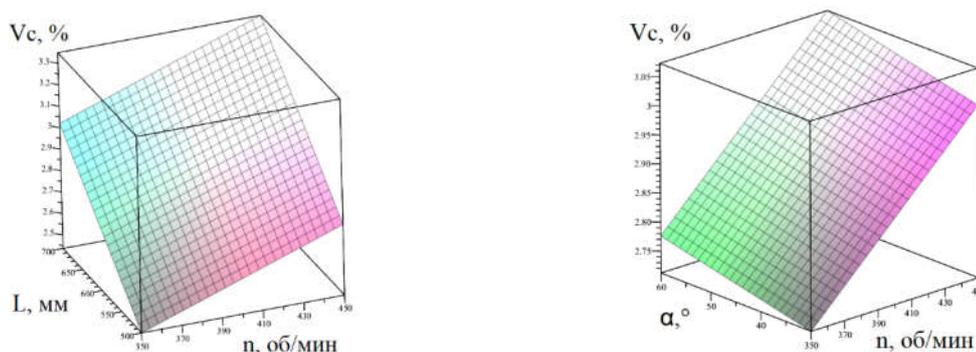
$$E = 0,029n - 0,0015\alpha + 0,73 \quad (1)$$

$$E = 0,0027n + 0,7533 \quad (2)$$

$$E = 1,6833 + 0,0033\alpha \quad (3)$$

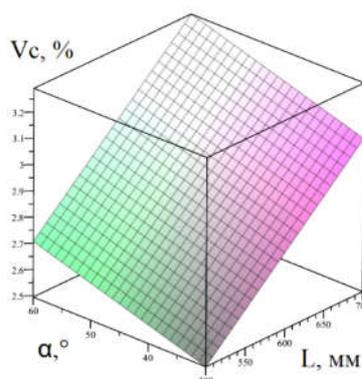
Поверхности откликов в зависимости E от n и α , E от n и L , E от L и α представ-

лены, соответственно, на рисунках 2 а, б и в.



а

б



в

Рисунок 3. Поверхности откликов: а – V_c от L и n ; б – V_c от α и n ; в – V_c от α и L

Проводя анализ уравнений регрессии (4, 5, 6) и графических зависимостей (3 а, б, в), можно сделать вывод, что наибольшее влияние на однородность смеси оказывает шаг установки завихрителей потока L и частота вращения рабочего стола n . Угол установки завихрителей потока на наклонной спирали оказывает незначительное влияние на качественные показатели смеси. При уменьшении шага установки завихрителей потока и частоты вращения стола однородность смеси повышается. В исследуемом диапазоне выбранных факторов неоднородность смеси изменялась от 2,5 до 8,36%.

Заключение. Для производства кормов из сухих сыпучих компонентов целе-

сообразно применять предлагаемую конструкцию центробежного смесителя, так как качество полученной смеси соответствует значениям, установленным зоотехническими требованиями.

На основании проведенных экспериментальных исследований и регрессионного анализа определены оптимальные значения параметров: частота вращения рабочего стола с шероховатой поверхностью $n=350$ об/мин; шаг установки завихрителей потока $L=500$ мм; угол установки завихрителей потока $\alpha=30^\circ$. Коэффициент неоднородности смеси при этом составляет $V_c=2,5\%$ при минимальной энергоёмкости процесса $E=1,65$ кВт/т.

Список источников

1. Сабиев У.К., Есмаганбетов Е.С. Смеситель-увлажнитель гравитационного действия // Вестник Омского ГАУ, 2024. № 3 (55). С. 144-150. EDN: FPWDKZ
2. Симачкова М.С. Обоснование структурно-логической схемы смесителя кормов // Вестник НГИЭИ, 2020. № 8 (111). С. 5-15. doi: 10.24411/2227-9407-2020-10069. EDN: WYFWNW
3. Экономическое и энергетическое обоснование разработки смесителя компонентов комбикормов / П.А. Савиных, Н.В. Турубанов, Н.А. Чернатъев // Вестник НГИЭИ, 2023. № 6 (145). С. 7-17. doi: 10.24412/2227-9407-2023-6-7-17. EDN: YYKUPF

4. Яцунов А.Н., Сабиев У.К. Сравнительный анализ рабочих органов вибрационного смесителя сыпучих кормов // *Тракторы и сельхозмашины*, 2022. Т. 89. № 5. С. 367-374. doi: 10.17816/0321-4443-109666. EDN: JVQFRT
5. Смеситель с z-образной рабочей лопастью для высоковязких компонентов / Л.И. Лыткина, А.А. Шевцов, С.А. Переверзев // *Вестник ВГУИТ*, 2017. Т. 79. № 4. С. 15-18. doi: 10.20914/2310-1202-2017-4-15-18. EDN: YRTTPV
6. Борисова А.А. Коэффициент вариации. Критерии эффективности использования смесителей кормов // *Фундаментальные и прикладные научные исследования: сборник трудов по материалам V Международного конкурса научно-исследовательских работ, награжденных дипломами I степени*, Уфа, 20 сентября 2021 года. Уфа: ООО "Научно-издательский центр "Вестник науки", 2021. С.12-18. EDN: WFAUPB
7. Многофакторный статистический анализ процесса смешивания при получении кормовой добавки на основе свекловичного жома / А.В. Дранников, А.А. Шевцов, А.В. Квасов, Л.И. Лыткина, А.Р. Бубнов, С.П. Волков // *Вестник ВГУИТ*, 2020. Т. 82. №1. С. 27-33. doi: 10.20914/2310-1202-2020-1-27-33. EDN: UELHVK
8. Разработка установки для определения однородности смешивания комбикормов методом цифровой обработки изображений / С.Ю. Булатов, Е.А. Герасимов, Г.С. Малышев, О.А. Тареева // *Вестник Омского ГАУ*, 2024. № 1 (53). С.124-139. EDN: UGLWFD
9. Бородулин Д.М., Сухоруков Д.В., Суворова Ю.П. Обзор конструкций барабанных смесителей, подающих сегрегацию сыпучих смесей. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 2023. Т. 85. № 3. С. 52-59. doi: 10.20914/2310-1202-2023-3-52-59. EDN: UVHYEQ
10. Критерии и способы оценки качества смешивания сыпучих материалов / В.В. Воронин, К.А. Адигамов, С.С. Петренко, Р.А. Сизякин // *Инженерный вестник Дона*. 2012. № 4-2(23). С. 36-40. EDN: PVJCJD
11. Садов В.В., Сорокин С.А. Интенсификация процесса смешивания комбикормов в вертикальном шнековом смесителе // *Вестник Алтайского ГАУ*, 2023. №4 (222). С. 86-92. doi: 10.53083/1996-4277-2023-222-4-86-92. EDN: FNOQLR
12. Моделирование движения материальных потоков в центробежно-шнековом смесителе / Д.М. Бородулин, С.А. Ратников, А.С. Козымаев, Е.А. Андрушкова, Д.И. Киселев // *Вестник КрасГАУ*, 2015. № 1. С. 102-108. EDN: TMLMAZ
13. Patricia M. Portillo, Marianih G. Lerapetritou, Fernando J. Muzzio. Effects of rotation rate, Mixing angle, and cohesion in two continuous powder mixers - A statistical approach // *Department of Chemical and Biochemical Engineering. Rutgers University, Piscataway. NJ08854. United States. Powder Technology*, 2009. № 194. Pp. 217-227. doi: 10.1016/j.powtec.2009.04.010
14. Авакимянц Е.В. Повышение эффективности приготовления кормовых добавок путем обоснования параметров и режимов работы смесителя: автореф. дис....канд. техн. наук: 4.3.1 / Авакимянц Евгений Вячеславович. Санкт-Петербург, 2023. 19 с.
15. Патент на полезную модель № 189127 U1 Российская Федерация, МПК B01F 7/26. Смеситель сыпучих компонентов центробежного действия: № 2018134845: заявл. 01.10.2018: опубл. 13.05.2019 / А.В. Семенов, И.А. Чаплыгина, В.В. Матюшев [и др.]; заявитель ФГБОУ ВО "Красноярский ГАУ". EDN: ZRVLCP
16. Совершенствование конструкции смесителя сыпучих компонентов центробежного смесителя / В.В. Матюшев, А.В. Семенов, И.А. Чаплыгина, А.Н. Бочкарев // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*, 2020. № 2 (82). С. 136-140. EDN: RPAALE
17. Исследование режимов работы центробежного смесителя сыпучих компонентов / В.В. Матюшев, А.Н. Бочкарев, А.В. Семенов, И.А. Чаплыгина // *Вестник Омского ГАУ*, 2021. № 94 (44). С.206-214. doi: 10.48136/2222-0364_2021_4_206. EDN: VVNZXB

References

1. Sabiev U.K., Esmaganbetov E.S. Gravity mixer humidifier. *Vestnik of Omsk SAU*. 2024;3(55):144-150 (In Russ.)
2. Simachkova M.S. Justification of the structural and logical scheme of the feed mixer. *Bulletin NGIEI*. 2020;8(111):5-15 (In Russ.) doi: 10.24411/2227-9407-2020-10069
3. Savinykh P.A., Turubanov N.V., Chernatiev N.A. Economic and energy justification for the development of a mixer of feed components. *Bulletin of NGIEI*. 2023;6(145):7-17 (In Russ.). doi: 10.24412/2227-9407-2023-6-7-17
4. Yatsunov A.N., Sabiev U.K. Comparative analysis of the working bodies of the vibrating mixer of bulk feed. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2022; Vol.89, No5:367-374 (In Russ.). doi: 10.17816/0321-4443-109666
5. Lytkina L.I., Shevtsov A.A., Pereverzev S.A. The mixer with z-shaped working blades for high viscosity components. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2017; Vol.79, No4:15-18 (In Russ.). doi: 10.20914/2310-1202-2017-4-15-18
6. Borisova A.A. Coefficient of variation. Criteria for the effectiveness of using feed mixers. *Fundamental and applied scientific research: A collection of papers*, Ufa, September 20, 2021. Ufa: Scientific Publishing Center "Bulletin of Science", LLC, 2021. Pp.12-18 (In Russ.).

7. Drannikov A.V., Shevtsov A.A., Kvasov A.V., Lytkina L.I., Bubnov A.R., Volkov S.P. Multivariate statistical analysis of the mixing process in the preparation of feed additives based on beet pulp. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2020; Vol.82, No1:27-33 (In Russ.). doi: 10.20914/2310-1202-2020-1-27-33
8. Bulatov S.Y., Gerasimov E.A., Malyshev G.S., Tareeva O.A. Development of an installation for determining the uniformity of mixed feed by digital image processing. *Vestnik of Omsk SAU*. 2024;1(53):124-139 (In Russ.).
9. Borodulin D.M., Sukhorukov D.V., Suvorova Y.P. Overview of drum mixer designs suppressing segregation of bulk mixture. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2023; Vol.85, No 3:52-59 (In Russ.). doi: 10.20914/2310-1202-2023-3-52-59
10. Voronin V.V., Adigamov K.A., Petrenko S.S., Sizyakin R.A. Criteria and methods for assessing the quality of the mixing of bulk materials. *Engineering journal of don*. 2012;4-2(23):36-40 (In Russ.).
11. Sadov V.V., Sorokin S.A. Intensification of compound feed mixing process in a vertical screw mixer. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2023;4(222):86-92 (In Russ.). doi: 10.53083/1996-4277-2023-222-4-86-92.
12. Borodulin D.M., Ratnikov S.A., Kozymaev A.S., Andryushkova E.A., Kiselev D.I. Modelling of the material stream movement in the centrifugal-auger mixer. *Bulletin of KSAU*. 2015;1:102-108 (In Russ.).
13. Patricia M. Portillo, Marianih G. Lerapetritou, Fernando J. Muzzio. Effects of rotation rate. Mixing angle, and cohesion in two continuous powder mixers - A statistical approach. Department of Chemical and Biochemical Engineering. Rutgers University, Piscataway. NJ08854. United States. Powder Technology. 2009; No 194:217-227. doi: 10.1016/j.powtec.2009.04.010
14. Avakimyants E.V. Improving the efficiency of the preparation of feed additives by substantiating the parameters and operating modes of the mixer: Candidate's dissertation abstract. St. Petersburg, 2023. 19 p. (In Russ.).
15. Utility Model patent No. 189127 U1 Russian Federation, IPC B01F 7/26. Mixer of bulk components of centrifugal action : No. 2018134845 : application 01.10.2018 : published 13.05.2019 / A.V. Semenov, I.A. Chaplygina, V.V. Matyushev [et al.] (In Russ.).
16. Matyushev V.V., Semenov A.V., Chaplygina I.A., Bochkarev A.N. Improvement of the design of the centrifugal mixer of bulk components. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2020;2(82):136-140 (In Russ.).
17. Matyushev V.V., Bochkarev A.N., Semenov A.V., Chaplygina I.A. Investigation of the operating modes of a centrifugal mixer of bulk components. *Vestnik of Omsk SAU*. 2021;94(44):206-214 (In Russ.). doi: 10.48136/2222-0364_2021_4_206.

Сведения об авторах

Александр Викторович Семенов – кандидат технических наук, доцент кафедры механизация и технический сервис в АПК, Красноярский государственный аграрный университет, semenov02101960@gmail.com;

Василий Викторович Матюшев – доктор технических наук, профессор кафедры товароведение и управление качеством продукции АПК, Красноярский государственный аграрный университет, don.matyusheff2015@yandex.ru;

Ирина Александровна Чаплыгина – кандидат биологических наук, доцент кафедры товароведение и управление качеством продукции АПК, Красноярский государственный аграрный университет, ledum_palustre@mail.ru;

Дмитрий Владимирович Карабухин – магистрант, Красноярский государственный аграрный университет, karabuhindmitry@yandex.ru.

Information about the authors

Alexander V. Semenov – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Chair of Mechanization and Technical Service in Agriculture, Krasnoyarsk State Agrarian University, semenov02101960@gmail.com;

Vasily V. Matyushev – Doctor of Science (Engineering), Professor, Chair of Commodity Science and Quality Management of Agricultural Products, Krasnoyarsk State Agrarian University, don.matyusheff2015@yandex.ru;

Irina A. Chaplygina – Candidate of Science (Biology), Associate Professor, Chair of Commodity Science and Quality Management of Agricultural Products, Krasnoyarsk State Agrarian University, ledum_palustre@mail.ru;

Dmitry V. Karabukhin – Master student, Krasnoyarsk State Agrarian University, karabuhindmitry@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 26.05.2025; одобрена после рецензирования 03.07.2025; принята к публикации 08.07.2025.

The article was submitted 26.05.2025; approved after reviewing 03.07.2025; accepted for publication 08.07.2025.