

Научная статья/Research Article

УДК 66.022.54

DOI: 10.36718/1819-4036-2023-4-202-209

Василий Викторович Матюшев^{1✉}, Артур Самвелович Аветисян²,
Ирина Александровна Чаплыгина³, Алексей Андреевич Беляков⁴

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

⁴Ачинский филиал Красноярского государственного аграрного университета, Ачинск, Красноярский край, Россия

^{1,2}matyushe@yandex.ru

³ledum_palustre@mail.ru

⁴bellimfor@yandex.ru

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СМЕШИВАНИЯ СЫПУЧИХ РАСТИТЕЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ

Цель исследования – аналитическое моделирование закономерностей функционирования запатентованного смесителя сыпучих растительных компонентов и оптимизация его параметров. Для решения поставленной цели необходимо аналитически обосновать вариабельность и энергоёмкость процесса смешивания сыпучих растительных компонентов в зависимости от факторных показателей. Аналитическая модель смешивания сыпучих растительных компонентов разработана для запатентованной конструкции лопастного смесителя. В качестве факторов были выбраны: угловая скорость вала смесителя; угол наклона лопаток; содержание пшена в смеси. Критериями оптимизации являлись: вариабельность смеси и энергоёмкость процесса смешивания сыпучих компонентов. Для аналитического моделирования использовался компьютерный пакет Maple. Аналитическое моделирование закономерностей функционирования модифицированного смесителя сыпучих растительных компонентов и оптимизация его параметров реализованы в несколько шагов: выполнен аналитический мониторинг группы показателей процесса смешивания, включающий систематизацию и статистическую обработку экспериментальных данных; аналитическое представление вариабельности и энергоёмкости процесса смешивания сыпучих растительных компонентов; оптимизация процесса смешивания сыпучих растительных компонентов по значениям результатных показателей вариабельности и энергоёмкости. Получены уравнения регрессии вариабельности и энергоёмкости процесса смешивания сыпучих растительных компонентов. Так, наибольшее влияние на вариабельность среди факторных показателей оказывает угол наклона лопаток, имеющий наибольшее значение по абсолютной величине, далее – содержание пшена в смеси, а затем угловая скорость вращения вала смесителя. Однако по влиянию на энергоёмкость наибольшее воздействие отмечено для угловой скорости вращения вала с оценкой по абсолютной величине коэффициента корреляции. На втором месте по влиянию – угол наклона лопаток, на третьем месте – содержание пшена в смеси.

Ключевые слова: аналитическая модель, смеситель, смесь, компонент, фактор, вариабельность, энергоёмкость, корреляция, уравнение регрессии

Для цитирования: Аналитическая модель смешивания сыпучих растительных компонентов / В.В. Матюшев [и др.] // Вестник КрасГАУ. 2023. № 4. С. 202–209. DOI: 10.36718/1819-4036-2023-4-202-209.

Vasily Viktorovich Matyushev^{1✉}, Arthur Samvelovich Avetisyan²,

Irina Aleksandrovna Chaplygina³, Alexey Andreyevich Belyakov⁴

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

⁴Achinsk Branch of Krasnoyarsk State Agrarian University, Achinsk, Krasnoyarsk Region, Russia

^{1,2}matyushe@yandex.ru

³ledum_palustre@mail.ru

⁴bellimfor@yandex.ru

ANALYTICAL MODEL OF MIXING LOOSE VEGETABLE COMPONENTS

The purpose of the study is the analytical modeling of the functioning of the patented mixer of loose vegetable components and the optimization of its parameters. To achieve this goal, it is necessary to analytically substantiate the variability and energy intensity of the process of mixing bulk plant components depending on factor indicators. An analytical model for mixing loose herbal ingredients has been developed for the patented paddle mixer design. The factors chosen were: the angular velocity of the mixer shaft; blade angle; millet content in the mixture. The optimization criteria were: the variability of the mixture and the energy intensity of the process of mixing loose components. For analytical modeling, the Maple computer package was used. Analytical modeling of the regularities of functioning of the modified mixer of loose plant components and optimization of its parameters were implemented in several steps: analytical monitoring of a group of indicators of the mixing process was performed, including systematization and statistical processing of experimental data; analytical representation of the variability and energy intensity of the process of mixing loose plant components; optimization of the process of mixing loose plant components according to the values of the result indicators of variability and energy intensity. Regression equations for the variability and energy intensity of the process of mixing loose plant components are obtained. Thus, among the factorial indicators, the greatest influence on the variability is exerted by the angle of inclination of the blades, which has the greatest value in absolute value, then the content of millet in the mixture, and then the angular velocity of rotation of the mixer shaft. However, in terms of the effect on energy intensity, the greatest impact was noted for the angular velocity of rotation of the shaft, assessed by the absolute value of the correlation coefficient. The second place in terms of influence is occupied by the angle of inclination of the blades, the third place refers to the content of millet in the mixture.

Keywords: analytical model, mixer, mixture, component, factor, variability, energy intensity, correlation, regression equation

For citation: Analytical model of mixing loose vegetable components / V.V. Matyushev [et al.] // Bulliten KrasSAU. 2023;(4): 202–209. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2023-4-202-209.

Введение. Смесители сыпучих компонентов нашли широкое применение в комбикормовой, пищевой, химической, фармацевтической и других отраслях промышленности. Основным требованием, предъявляемым к оборудованию, является стабильное качество смеси за счет равномерного распределения частиц различных свойств и массы [1–3].

Получение качественных сыпучих смесей из растительных компонентов зависит от типа смесительных элементов, рациональных конструктивно-режимных параметров применяемого оборудования, предотвращающих сегрегационные процессы. В качестве недостатков существующего смесительного оборудования следует отметить сложность конструкции и высокие энергозатраты при смешивании сыпучих материалов. Проектирование оборудования для

смешивания сыпучих компонентов связано с аналитическим моделированием данного процесса. Аналитическая модель является необходимой составляющей цифровизации результатных показателей и последующей разработки систем автоматизированного контроля технологических процессов, а также необходимостью реализовать системный подход при модельном представлении объекта [4–8]. В связи с этим актуальными являются теоретические исследования с использованием аналитического аппарата, направленные на совершенствование старого и проектирование нового оборудования.

Цель исследования – аналитическое моделирование закономерностей функционирования запатентованного смесителя сыпучих растительных компонентов и оптимизация его параметров.

Задачи: аналитически обосновать вариативность и энергоёмкость процесса смешивания сыпучих растительных компонентов в зависимости от факторных показателей.



Материалы и методы. В Красноярском ГАУ была разработана и запатентована конструкция лопастного смесителя (рис. 1) [9].

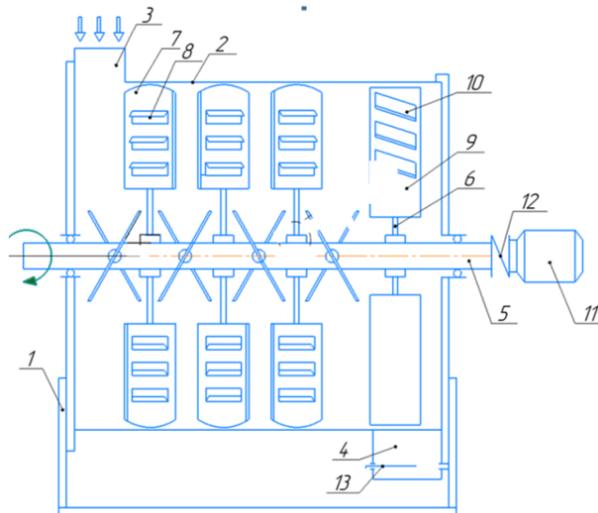


Рис. 1. Общий вид и схема лопастного смесителя:

1 – рама; 2 – цилиндрический корпус; 3 – загрузочное отверстие; 4 – разгрузочное отверстие; 5 – вал; 6 – лопасть; 7 – пластина; 8 – П-образные прорезы; 9 – отбойная пластина; 10 – направляющая потока смеси компонентов; 11 – мотор-редуктор; 12 – муфта; 13 – заслонка

В качестве компонентов для смешивания использовалось зерно пшеницы и пшено. В качестве факторов были выбраны: угловая скорость вала смесителя, об/мин (x_1); угол наклона лопаток, град. (x_2); содержание пшена в смеси, % (x_3). Интервал варьирования факторов составляет: угловая скорость вращения вала смесителя – 40–60 об/мин; угол наклона лопаток – 30–60 град.; содержание пшена в смеси – 10–20 %. Критериями оптимизации являлись: вариативность смеси (% вар) и энергоёмкость процесса смешивания (кВт ч/т). Для аналитического моделирования использовался компьютерный пакет Maple.

При разработке аналитической модели смешивания сыпучих растительных компонентов использована апробированная методика цифровизации результатных показателей [10, 11].

Аналитическое моделирование закономерностей функционирования модифицированного смесителя растительных компонентов и оптимизация его параметров выполнены в несколько шагов: аналитический мониторинг группы по-

казателей процесса смешивания, включающий систематизацию и статистическую обработку экспериментальных данных; аналитическое представление вариативности и энергоёмкости процесса смешивания сыпучих растительных компонентов; оптимизация процесса смешивания сыпучих растительных компонентов по значениям результатных показателей вариативности и энергоёмкости.

На основе статистического анализа данных, характеризующих процесс смешивания растительных компонентов, построены 2-мерные корреляционные поля для следующих показателей: «вариативность – угловая скорость вращения вала» (рис. 2), «вариативность – угол наклона лопаток» (рис. 3), «вариативность – содержание пшена в смеси» (рис. 4), «вариативность – энергоёмкость» (рис. 5). Аналогично построено 3-мерное корреляционное поле изменения вариативности (F , %вар) процесса смешивания сыпучих растительных компонентов при изменениях обобщенного фактора (x , у.е.) и энергоёмкости (x_4 , кВт ч/т) (рис. 6).

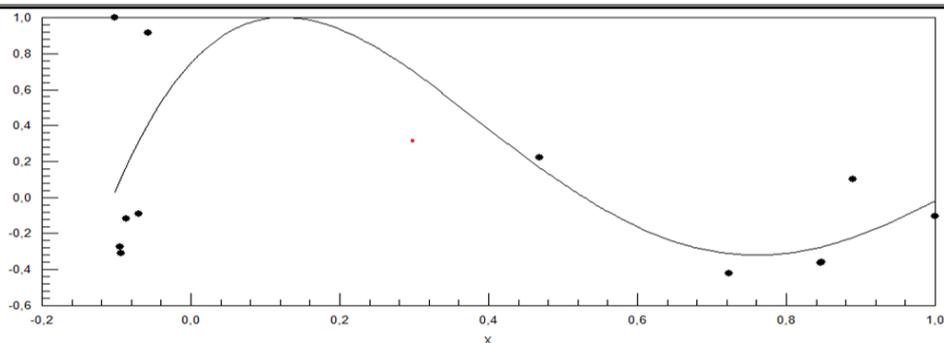


Рис. 2. Изменение варибельности (F , %вар) процесса смешивания сыпучих растительных компонентов при изменении угловой скорости вращения вала (x_1 , об/мин) в 2-мерном корреляционном поле

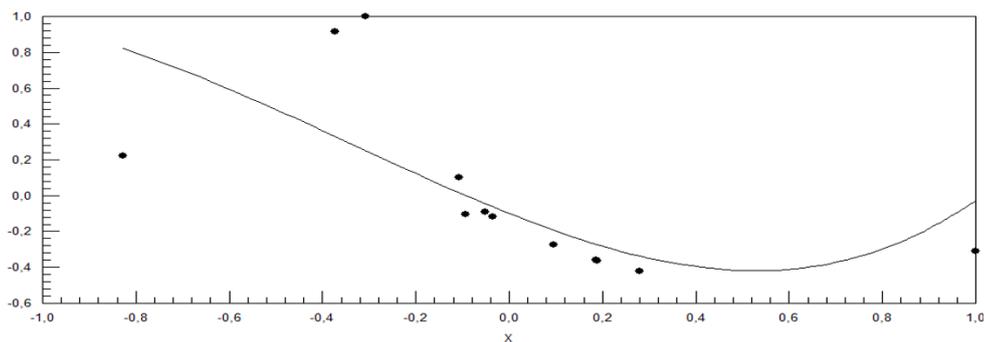


Рис. 3. Изменение варибельности (F , %вар) процесса смешивания сыпучих растительных компонентов при изменении угла наклона (x_2 , град.) лопаток в 2-мерном корреляционном поле

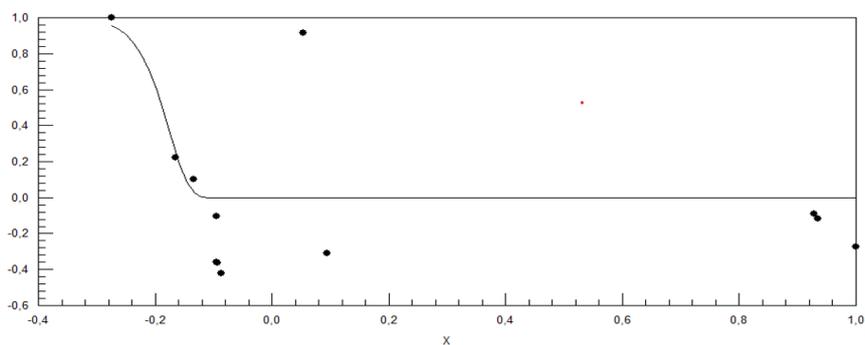


Рис. 4. Изменение варибельности (F , %вар) процесса смешивания сыпучих растительных компонентов при изменении содержания (x_3 , %) пшени в смеси в 2-мерном корреляционном поле

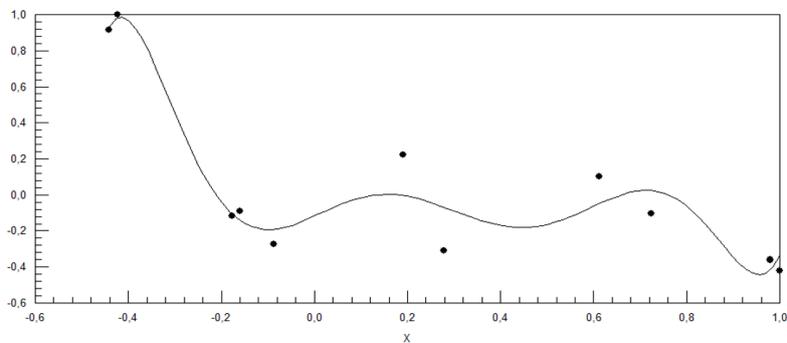


Рис. 5. Изменение варибельности (F , %вар) процесса смешивания сыпучих растительных компонентов при изменении энергоёмкости (x_4 , кВт ч/т) этого процесса в 2-мерном корреляционном поле

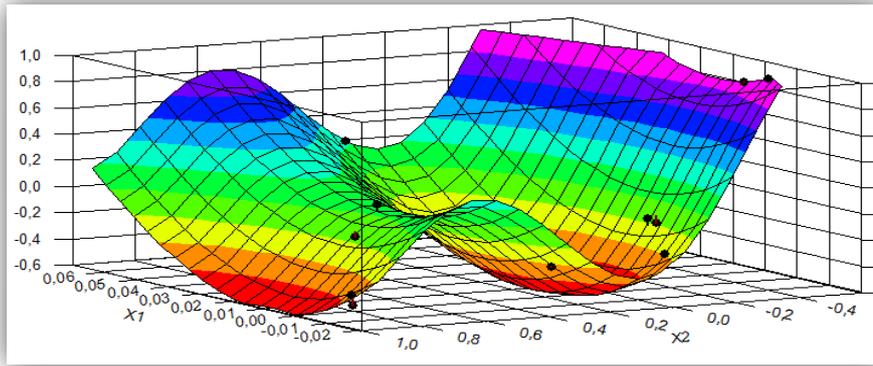


Рис. 6. Изменение variability (F , %вар) процесса смешивания сыпучих растительных компонентов при изменениях обобщенного фактора (x , у.е.) и энергоёмкости (x_4 , кВт ч/т) в 3-мерном корреляционном поле

Результатный показатель variability процесса смешивания сыпучих растительных компонентов в зависимости от факторных показателей x_1, x_2, x_3 и энергоёмкости этого процесса представляется следующим уравнением регрессии:

$$F(x_1, x_2, x_3, x_4) = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_5 x_1 x_2 x_3,$$

где $b_0 = 0,3046064602$, $b_1 = 0,5041856644$, $b_2 = -0,2136669431$, $b_3 = -0,6222869426$, $b_4 = -1,213439731$, $b_5 = -5,53092256$ – коэффициенты регрессии.

Таким образом, найденные корреляционные зависимости позволили выявить регрессионную (функциональную) зависимость (связь) и определить ее форму, обеспечившую высокий уровень детерминации – 98,73 %.

Анализ опытных данных variability процесса смешивания показал, что этот показатель детерминирован на уровне 95,65 % и в зависимости от 10 определяемых показателей представляется линейной функцией регрессии

$$F = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + \sum_{k=4}^{10} b_k \cdot x_k + \varepsilon,$$

где $b_0 = -7,763290453$, $b_1 = 0,013888825$, $b_2 = 0,0498811769$, $b_3 = -0,0577849984$, $b_4 = 0,04686466431$, $b_5 = 0,6269960263$, $b_6 = -0,06316852773$, $b_7 = -177,737683$, $b_8 = 355,6337087$, $b_9 = -0,02945162281$, $b_{10} = 0,2976953805$ – коэффициенты линейной регрессии, ε – случайный (возмущающий) фактор.

Анализ опытных данных энергоёмкости процесса смешивания сыпучих компонентов показал, что этот показатель детерминирован на

уровне 99,98 % и в зависимости от 10 определяемых показателей представляется линейной функцией регрессии

$$G = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + \sum_{k=4}^{10} b_k \cdot x_k + \varepsilon,$$

где $b_0 = 0,1072800962$, $b_1 = -0,001703900448$, $b_2 = -9,773423955E-005$, $b_3 = 0,000112767613$, $b_4 = 2,339791022E-007$, $b_5 = 0,0001072577794$, $b_6 = -1,656034902E-005$, $b_7 = 0,3769581015$, $b_8 = 0,1912852712$, $b_9 = 0,0001393240238$, $b_{10} = -0,0008739154393$ – коэффициенты линейной регрессии.

Показатель вариабельности изменяется в диапазоне 0,49–9,72 и имеет среднее значение 3,503667 при стандартном отклонении 2,345178 и вариации 66,93 %. Показатель энергоемкости изменяется в диапазоне 0,259–0,354, имеет среднее значение 0,314 при стандартном отклонении 0,033818 и вариации 10,77 %.

Взаимодействие в подгруппе факторных показателей незначительное, поскольку все коэффициенты корреляции этой подгруппы по абсолютной величине не превышают 0,095.

Взаимодействие в подгруппе результатных показателей представляется коэффициентом корреляции $\rho(F, G) = 0,42211$ – наблюдается отрицательная корреляционная связь между вариабельностью и энергоемкостью процесса. Объясняется различным характером воздействия подгруппы факторных показателей на вариабельность и энергоемкость (в установленных областях изменений факторных показателей).

Заключение. В результате моделирования закономерностей функционирования запатентованного смесителя сыпучих растительных компонентов установлена сопряженность показателей вариабельности и энергоемкости процесса смешивания. Увеличение энергоемкости связано с ростом производительности, но приводит к снижению устойчивости по вариабельности. Обратное, повышение устойчивости процесса посредством снижения его вариабельности приводит к ограничению энергоемкости и уменьшению производительности.

Так, на первом месте по влиянию на вариабельность ($F, \% \text{вар}$) среди факторных показателей находится угол наклона лопаток ($x_2, \text{град.}$), имеющий наибольшее по абсолютной величине значение $|\rho(x_2, F)| = 0,30729$ (среди всех факторных оценок $|\rho(x_k, F)|$, $k = 1, 2, 3$). На втором месте – содержания пшеницы в смеси ($x_3, \%$), на третьем месте – угловая скорость вращения вала ($x_1, \text{об/мин}$). Однако на первом месте по влиянию на энергоемкость находится угловая скорость вращения вала ($x_1, \text{об/мин}$), с оценкой по абсолютной величине коэффициента корреляции $|\rho(x_1, G)| = 0,724383$. На втором месте – угол наклона лопаток ($x_2, \text{град.}$), на третьем месте – содержание пшеницы в смеси ($x_3, \%$).

Список источников

1. *Аветисян А.С., Матюшев В.В., Чаплыгина И.А.* Эффективность применения лопастного смесителя сыпучих компонентов в технологии производства экструдатов // Научно-практические аспекты развития АПК: мат-лы нац. науч. конф. (Красноярск, 12 ноября 2021 г.) / Краснояр. гос. аграр. ун-т. Красноярск, 2021. С. 61–64.
2. Анализ существующих и перспективных конструкций смесителей сыпучих компонентов / *В.В. Матюшев* [и др.] // Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития: мат-лы междунар. науч.-практ. конф. (Красноярск, 21–23 апреля 2020 г.) / Краснояр. гос. аграр. ун-т. Красноярск, 2020. Ч. 2. С. 178–181.
3. *Аветисян А.С.* Совершенствование конструкции лопастного смесителя сыпучих компонентов // Инновационные тенденции развития российской науки: мат-лы XIV междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых. (Красноярск, 7–9 апреля 2021 г.) / Краснояр. гос. аграр. ун-т. Красноярск, 2021. Ч. 1 С. 398–400.
4. *Моисеев Н.Н.* Математические задачи системного анализа. М.: Наука, 1981. 448 с.
5. *Кобзарь А.И.* Прикладная математическая статистика для инженеров и научных работников. М.: Физматлит, 2012. 816 с.
6. Компьютерные технологии при проектировании и эксплуатации технологического оборудования: учеб. пособие / *Г.В. Алексеев* [и др.]. СПб.: ГИОРД, 2012. 256 с.
7. Численные методы при моделировании технологических машин и оборудования: учеб. пособие / *Г.В. Алексеев* [и др.]. СПб.: ГИОРД, 2014. 200 с.
8. *Сажин С.Г.* Средства автоматического контроля технологических параметров: учеб. пособие. М.: Лань, 2014. 368 с.
9. Пат. 192831 RU, МПКВ01F7/02 (2006.01), В28С 5/14 (2006.01). Лопастной смеситель / *Матюшев В.В., Семенов А.В., Чаплыгина И.А., Аветисян А.С.*; патентообладатель Красноярский государственный аграрный

- университет. № 2019122007; заявл. 09.07.2019; опубл. 02.10.2019.
10. Экспертно-аналитическая модель получения энергонасыщенных экструдатов из питательных смесей на основе зерна / *Чаплыгина И.А., Матюшев В.В., Семенов А.В., Беляков А.А.* Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022613485, 14.03.2022. Заявка № 2022612862 от 02.03.2022.
 11. Моделирование качества зерновых кормов, обработанных методом экструдирования с предварительным проращиванием одного из компонентов / *Матюшев В.В., Чаплыгина И.А., Семенов А.В., Беляков А.А.* Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2020667319, 22.12.2020. Заявка № 2020666856 от 16.12.2020.
- References**
1. *Avetisyan A.S., Matyushev V.V., Chaplygina I.A.* 'Effektivnost' primeneniya lopastnogo smesitelya sypuchih komponentov v tehnologii proizvodstva `ekstrudatov // Nauchno-prakticheskie aspekty razvitiya APK: mat-ly nac. nauch. konf. (Krasnoyarsk, 12 noyabrya 2021 g.) / Krasnoyarsk. gos. agrar. un-t. Krasnoyarsk, 2021. S. 61–64.
 2. Analiz suschestvuyuschih i perspektivnyh konstrukcij smesitelej sypuchih komponentov / *V.V. Matyushev* [i dr.] // Nauka i obrazovanie: opyt, problemy, perspektivy razvitiya: mat-ly mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Krasnoyarsk, 21–23 aprelya 2020 g.) / Krasnoyarsk. gos. agrar. un-t. Krasnoyarsk, 2020. Ch. 2. S. 178–181.
 3. *Avetisyan A.S.* Sovershenstvovanie konstrukcii lopastnogo smesitelya sypuchih komponentov // Innovacionnye tendencii razvitiya rossijskoj nauki: mat-ly XIV mezhdunar. nauch.-prakt. konf. molodyh uchenyh (Krasnoyarsk, 7–9 aprelya 2021 g.) / Krasnoyarsk. gos. agrar. un-t. Krasnoyarsk, 2021. Ch. 1. S. 398–400.
 4. *Moiseev N.N.* Matematicheskie zadachi sistemnogo analiza. M.: Nauka, 1981. 448 s.
 5. *Kobzar' A.I.* Prikladnaya matematicheskaya statistika dlya inzhenerov i nauchnyh rabotnikov. M.: Fizmatlit, 2012. 816 s.
 6. Komp'yuternye tehnologii pri proektirovanii i `ekspluatatsii tehnologicheskogo oborudovaniya: ucheb. posobie / *G.V. Alekseev* [i dr.]. SPb.: GIOR, 2012. 256 s.
 7. Chislennyye metody pri modelirovanii tehnologicheskikh mashin i oborudovaniya: ucheb. Posobie / *G.V. Alekseev* [i dr.]. SPb.: GIOR, 2014. 200 s.
 8. *Sazhin S.G.* Sredstva avtomaticheskogo kontrolya tehnologicheskikh parametrov: ucheb. posobie. M.: Lan', 2014. 368 s.
 9. Pat. 192831 RU, MPKV01F7/02 (2006.01), V28S 5/14 (2006.01). Lopastnoj smesitel' / *Matyushev V.V., Semenov A.V., Chaplygina I.A., Avetisyan A.S.*; patentoobladatel' Krasnoyarskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet. № 2019 122007; zayavl. 09.07.2019; opubl. 02.10.2019.
 10. 'Ekspertno-analiticheskaya model' polucheniya `energonasyschennyh `ekstrudatov iz pitatel'nyh smesej na osnove zerna / *Chaplygina I.A., Matyushev V.V., Semenov A.V., Belyakov A.A.* Svidetel'stvo o registracii programmy dlya `EVM 2022613485, 14.03.2022. Zayavka № 20226 12862 ot 02.03.2022.
 11. Modelirovanie kachestva zernovyh kormov, obrabotannyh metodom `ekstrudirovaniya s predvaritel'nym proraschivaniem odnogo iz komponentov / *Matyushev V.V., Chaplygina I.A., Semenov A.V., Belyakov A.A.* Svidetel'stvo o registracii programmy dlya `EVM 2020667319, 22.12.2020. Zayavka № 202066 6856 ot 16.12.2020.

Статья принята к публикации 10.03.2023 / The article accepted for publication 10.03.2023.

Информация об авторах:

Василий Викторович Матюшев¹, заведующий кафедрой товароведения и управления качеством продукции АПК, доктор технических наук, профессор

Артур Самвелович Аветисян², аспирант кафедры товароведения и управления качеством продукции АПК

Ирина Александровна Чаплыгина³, доцент кафедры товароведения и управления качеством продукции АПК, кандидат биологических наук, доцент

Алексей Андреевич Беляков⁴, доцент кафедры агроинженерии, кандидат технических наук, доцент

Information about the authors:

Vasily Viktorovich Matyushev¹, Head of the Department of Commodity Science and Quality Management of the Agroindustrial Complex, Doctor of Technical Sciences, Professor

Arthur Samvelovich Avetisyan², Postgraduate Student at the Department of Commodity Science and Quality Management of the Agroindustrial Complex

Irina Aleksandrovna Chaplygina³, Associate Professor at the Department of Commodity Science and Product Quality Management of the Agroindustrial Complex, Candidate of Biological Sciences, Docent

Alexey Andreyevich Belyakov⁴, Associate Professor at the Department of Agroengineering, Candidate of Technical Sciences, Docent

